

CAUSAS DE HUECOS DE TENSIÓN: ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN

JHONATAN JÁCOME GUERRERO

RUBÉN DARÍO LEAL VERJEL



Escuela de ingenierías
Eléctrica,
Electrónica y
Telecomunicaciones

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2010



CAUSAS DE HUECOS DE TENSIÓN: ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN

JHONATAN JÁCOME GUERRERO
RUBÉN DARÍO LEAL VERJEL

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director
JOHANN F. PETIT SUAREZ
Ingeniero Electricista, Ph,D

Codirector
VÍCTOR AUGUSTO BARRERA NÚÑEZ
Ingeniero Electricista, Ph,D (C)



Escuela de ingenierías
Eléctrica,
Electrónica y
Telecomunicaciones

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2010



DEDICATORIA

Dedico este trabajo al principal artífice, Dios, quien permite cumplir mis sueños.

A mi familia quienes depositaron en mí toda su confianza y creyeron en mis capacidades. Su amor incondicional es mi fuerza para alcanzar muchas metas durante todas las etapas de mi vida y mi carrera. A ellos que son el motor que me impulsa cada día para cumplir mis sueños y enfrentar todos mis problemas.

Jhonatan

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.

A DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro, por creer en mí, apoyarme en todo momento y brindarme todo su amor. A mi hermana por estar conmigo y apoyarme siempre, la quiero mucho.

Rubén



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Al Dr. Johann F. Petit Suarez por su orientación y apoyo.

Al Dr (c) Víctor Augusto Barrera Núñez por sus contribuciones, asesoramientos y apoyo permanentemente que hizo posible la culminación de este proyecto.

A todos los profesores, amigos y compañeros que con su constante apoyo, amor, consejos y enseñanzas nos guiaron por el camino correcto para formar un profesional íntegro, cuyo objetivo es deslumbrar al mundo como persona e ingeniero.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	23
1. GENERALIDADES.....	26
1.1 ANTECEDENTES	26
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	27
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	28
1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE GRADO	29
2. GENERALIDADES DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	30
2.1 GENERALIDADES.....	30
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	31
2.2.1 Magnitud (U_H).....	31
2.2.2 Caída de tensión (ΔU).....	32
2.2.3 Duración (ΔT)	32
2.2.4 Salto del ángulo de fase	32
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	33
2.3.1 Según su duración.....	33
2.3.2 Según su forma	34
2.3.3 Según su tipo.....	34
2.4 CAUSAS DE HUECOS DE TENSIÓN.....	38
3. INFLUENCIA DE LÍNEAS, TRANSFORMADORES Y MOTORES EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	39
3.1 INFLUENCIA LÍNEAS AÉREAS Y CABLES SUBTERRÁNEOS EN LA MAGNITUD DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	39



3.2 EFECTO DE LOS TRANSFORMADORES EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	43
3.2.1 Influencia de los transformadores en la magnitud del hueco de tensión...	43
3.2.2 Efecto de la conexión de los devanados del transformador en la transferencia de huecos a otros niveles de tensión.....	44
3.2.2.1 Transferencia de huecos de tensión generados por fallas eléctricas.....	50
3.2.2.1.1 Transferencia de huecos tipo B	51
3.2.2.1.2 Transferencia de huecos tipo C	54
3.2.2.1.3 Transferencia de huecos tipo E	57
3.2.2.2 Transferencia de huecos de tensión generados por fallas eléctricas a través de dos transformadores.....	61
3.2.2.2.1 Transferencia de un hueco tipo D.....	61
3.2.2.2.2 Transferencia de un hueco tipo F	62
3.2.2.2.3 Transferencia de un hueco tipo G	63
3.2.2.3 Observaciones y análisis de las transferencia de los huecos generados por fallas eléctricas.....	64
3.2.2.4 Transferencia de huecos de tensión generados por operación de elementos propios del sistema.....	66
3.3 INFLUENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS CAUSADOS POR FALLAS [8].....	69
3.3.1 Falla trifásica.....	69
3.3.2 Fallas desbalanceadas	70
4. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA.....	72



4.1 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS A ENERGIZACIÓN DE TRANSFORMADORES.....	75
4.2 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS AL ARRANQUE DE MOTORES.....	84
4.3 PROPAGACIÓN DE LA PERTURBACIÓN DEBIDA A LA ENERGIZACIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES.....	95
4.3.1 Caso 1 y Caso 2: Energización de bancos de condensadores.....	96
4.3.2 Caso 3: Energización de un banco de condensadores con un banco previamente energizado	106
4.3.3 Caso 4: Energización de ambos bancos al mismo instante de tiempo ..	111
4.4 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS A FALLAS DE RED	114
4.4.1 Falla monofásica nodo 862.....	114
4.4.2 Falla bifásica nodo 862.....	122
4.4.3 Falla bifásica a tierra nodo 862.....	128
4.4.4 Falla trifásica nodo 862.....	131
4.4.5 Influencia de la impedancia de falla a tierra (Z_f)	137
4.4.6 Influencia de la impedancia de falla entre fases (Z_{ff}).....	141
5. CONCLUSIONES.....	145
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
BIBLIOGRAFÍA.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores RMS de un hueco de tensión trifásico con una profundidad de 37% y una duración de 6 ciclos	31
Figura 2. UH: Magnitud de la tensión del hueco, U: Caída de tensión del hueco, Δt : Duración del hueco	32
Figura 3. Salto del ángulo de fase	33
Figura 4. Diagrama fasorial de tensiones hueco tipo C	37
Figura 5. Modelo de divisor de tensión	39
Figura 6. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia a la falla para tres niveles de cortocircuito, en una línea aérea de 11kV y $S=150\text{mm}^2$	41
Figura 7. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para una línea aérea de 11kV y diferentes secciones transversales	42
Figura 8. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para cable subterráneo de 11kV y diferentes secciones transversales	42
Figura 9. Sistema de potencia con fallas en dos niveles de tensión	43
Figura 10. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para falla a 33 kV y 132 kV.....	44
Figura 11. Modelo del hueco de tensión a partir de un divisor de tensión cuando la carga se encuentra en el secundario de un transformador	45
Figura 12. Circuito equivalente de secuencia cero para cada uno de los diferentes tipos de transformadores a) Transformador tipo 1 b) Transformador tipo 2 c) Transformador tipo 3.....	45
Figura 13. Esquema de un transformador tipo T_1 , conexión YNyn0, y $r_t=1$	46
Figura 14. Esquema de un transformador tipo T_2 , conexión YNy0, y $r_t=1$	47
Figura 15. Esquema de un transformador tipo T_2 , conexión Dd0, y $r_t=1$	48
Figura 16. Esquema de un transformador tipo T_3 , conexión Dyn3, y $r_t=3$	49
Figura 17. Modelo base para el estudio simulado en ATP.....	51



Figura 18. Transferencia hueco tipo B por un transformador T1 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario52

Figura 19. Transferencia hueco tipo B por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario53

Figura 20. Transferencia hueco tipo B por un transformador T3 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario54

Figura 21. Transferencia hueco tipo C por un transformador T1 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario55

Figura 22. Transferencia hueco tipo C por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario56

Figura 23. Transferencia hueco tipo C por un transformador T3 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario57

Figura 24. Transferencia hueco tipo E por un transformador T1 b) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario58

Figura 25. Transferencia hueco tipo E por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario59

Figura 26. Transferencia hueco tipo E por un transformador T3a) Circuito en ATP b) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario.....60

Figura 27. Hueco de tensión por transformador tipo T1 y T2 a) Causado por la energización del transformador b) Causado por el arranque del motor67



Figura 28. Hueco de tensión por transformador tipo T3 (Dy3) a) Causado por la energización del transformador b) Causado por el arranque del motor	67
Figura 29. Sistema de distribución IEEE a) Circuito topológico b) Esquemático en ATP	72
Figura 30. Modelo del motor en ATP	74
Figura 31. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$	75
Figura 32. Comparación de valores de corriente a) $i(t)$ Nodos 836-840 b) $irms(t)$ Nodos 836-840 c) $i(t)$ Nodos 834-860 d) $irms(t)$ Nodos 834-860 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ nodos 836-840 f) $\theta v(t)-\theta i(t)$ nodos 834-860.....	76
Figura 33. Nodo 890. Terminales del motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$ e) Velocidad del motor.....	78
Figura 34. Nodo 848. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$	79
Figura 35. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $i(t)$ b) $irms(t)$ c) $\theta v(t)-\theta i(t)$	81
Figura 36. Nodo 836 lado de alta del transformado al energizarlo con carga. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$	82
Figura 37. Nodo 800 cabecera de la subestación al energizar el transformador con carga. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	83
Figura 38. Nodo 890. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$ e) Velocidad del motor.	85
Figura 39. a) $v(t)$ Nodo 832 b) $v_{rms}(t)$ Nodo 832 c) $i(t)$ que fluye por el tramo 854-832 d) $irms(t)$ en el tramo 854-832 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	86
Figura 40. a) $i(t)$ que fluye por el tramo 832-858 b) $irms(t)$ en el tramo 832-858 c) $\theta v(t)-\theta i(t)$	87
Figura 41. a) $v(t)$ en el nodo 836 b) $v_{rms}(t)$ nodo 832 c) $i(t)$ que fluye del nodo 836 al lado de alta del transformador d) $irms(t)$ que fluye del nodo 836 al lado de alta del transformador e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	88
Figura 42. a) $v(t)$ en el nodo 862 b) $v_{rms}(t)$ nodo 862 c) $i(t)$ que fluye por el tramo 862-838 d) $irms(t)$ en el tramo 862-838 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	89



Figura 43. a) $v(t)$ en el nodo 848 b) $v_{rms}(t)$ nodo 848 c) $i(t)$ que fluye hacia el banco de condensadores en el nodo 848 d) $i_{rms}(t)$ que fluye hacia el banco de condensadores en el nodo 848 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 90

Figura 44. a) $v(t)$ nodo 800 b) $v_{rms}(t)$ nodo 800 c) $i(t)$ que entrega la fuente d) $i_{rms}(t)$ que entrega la fuente e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 92

Figura 45. Nodo 890 con el motor al 50% . a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) Velocidad del motor..... 94

Figura 46. Nodo 800 con el motor al 50% . a) $i(t)$ b) $i_{rms}(t)$ c) $v(t)$ d) $v_{rms}(t)$ 95

Figura 47. a) $v(t)$ nodo 844 b) $i(t)$ de entrada al banco conectado en el nodo 844. 97

Figura 48. Nodo 846 aguas abajo del banco de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 98

Figura 49. Nodo 842 aguas arriba del banco de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 99

Figura 50. Nodo 836 hacia el lado de alta del transformador, aguas abajo del banco. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 101

Figura 51. Nodo 862 lado de baja del transformador, aguas abajo del banco. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 102

Figura 52. Nodo 890 hacia el motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 103

Figura 53. Nodo 800, cabecera de la subestación. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 104

Figura 54. Nodo 846 aguas arriba del banco de condensadores energizado (Nodo 848) y aguas abajo del banco ya energizado (Nodo 844) a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 107

Figura 55. Nodo 834 aguas arriba de los bancos a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ 108



Figura 56. Nodo 800, cabecera de la subestación a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	109
Figura 57. Nodo 846, nodo entre ambos bancos de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	111
Figura 58. Nodo 800, cabecera de la subestación a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$	113
Figura 59. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.....	114
Figura 60. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.....	116
Figura 61. Diagrama Fasorial de tensiones a) Grupo de conexión Dy1 b) Grupo de conexión Dy3.....	117
Figura 62. Nodo 848. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$	119
Figura 63. Nodo 890 terminales del motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$. e) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla f) velocidad del motor.	120
Figura 64. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.	121
Figura 65. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.	123
Figura 66. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.	124
Figura 67. Nodo 890 terminales del motor. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.....	126
Figura 68. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	127



Figura 69. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	129
Figura 70. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	130
Figura 71. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	132
Figura 72. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	133
Figura 73. Nodo 890 terminales del motor. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	134
Figura 74. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.	136
Figura 75. Diagrama unifilar del circuito analizado	137
Figura 76. Falla monofásica a través de una impedancia Z_f puramente resistiva, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.....	138
Figura 77. Falla monofásica a través de un impedancia Z_f puramente reactiva, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.....	138
Figura 78. Falla monofásica a través de un impedancia Z_f con parte resistiva y reactiva de igual magnitud, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.....	139
Figura 79. Magnitud y fase para falla monofásica fase A Nodo 834 para tres valores de Z_f . a) $Z_f=1 [\Omega]$ b) $Z_f=20 [\Omega]$ c) $Z_f=60 [\Omega]$	140



Figura 80. Falla bifásica a través de una impedancia Z_{ff} puramente resistiva, fase B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.	142
Figura 81. Falla bifásica a través de un impedancia Z_{ff} puramente reactiva, fases B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.	142
Figura 82. Falla bifásica a través de un impedancia Z_{ff} con parte resistiva y reactiva de igual magnitud, fases B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.....	142
Figura 83. Magnitud y fase para falla bifásica fases B-C Nodo 834 para tres valores de falla Z_{ff} . a) $Z_{ff}=1$ [Ω] b) $Z_{ff}=20$ [Ω] c) $Z_{ff}=60$ [Ω].	143



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tensiones de los diferentes tipos de huecos con su respectivo diagrama fasorial.....	35
Tabla 2. Valores de impedancias para líneas aéreas y cables subterráneos de 11kV en función de la sección transversal. Tomado de [1]......	41
Tabla 3. Transferencia de huecos a otros niveles de tensión.....	65
Tabla 4. Características transformador Nodos 832-888	73
Tabla 5. Características motor de inducción.....	74
Tabla 6. Características transformador Nodos 832-888	74
Tabla 7. Potencia reactiva de los bancos de condensadores instalados en el sistema.....	96
Tabla 8. Cambio del factor de potencia nodo 800 Cabecera de la subestación... ..	104
Tabla 9. Transferencia falla monofásica Transformador Tipo 3	117
Tabla 10. Magnitud y ángulo de fase para falla monofásica fase A, Nodo 834 para tres valores de Z_f	140
Tabla 11. Magnitud y fase para falla bifásica fase B-C Nodo 834 para tres valores de R_f . Continua... ..	144



LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA.....	152
A.1. Falla trifásica.....	152
A.2. Falla trifásica a tierra.....	155
A.3. Falla fase-tierra.....	157
A.4. Falla fase-fase.....	160
A.5. Falla fase-fase-tierra.....	162
A.6. Determinación de los huecos de tensión para cargas conectadas en triángulos.....	165
ANEXO B. CAUSAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN.....	171



RESUMEN

TÍTULO: CAUSAS DE HUECOS DE TENSIÓN: ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN.*

AUTORES:

RUBÉN DARÍO LEAL VERJEL

JHONATAN JÁCOME GUERRERO**

PALABRAS CLAVES

Huecos de Tensión, Propagación de Huecos de Tensión, Perturbaciones Eléctricas, Sistemas de Distribución.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo de grado tiene como propósito general contribuir al estudio de los eventos de tensión, sus causas y su propagación a través de redes de distribución. Se presentan las causas de los eventos y sus respectivas formas de onda de tensión y corriente asociadas a cada causa. Se analiza el efecto de elementos de la red sobre las formas de onda de tensión y corriente, elementos tales como: transformadores, motores, bancos de condensadores, líneas aéreas y cables subterráneos en la propagación de los huecos de tensión.

Fue seleccionado el sistema de distribución IEEE de 34 nodos, el cual fue caracterizado en la herramienta de simulación de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP. El análisis de los eventos de tensión fue realizado en MATLAB. A partir del sistema seleccionado se analizaron los cambios que experimentan las formas de onda de tensión/corriente del evento de tensión como consecuencia de su propagación a través de la red de distribución. Adicionalmente se generó una base de datos para el sistema estudiado registrando las formas de onda de tensión y corriente en el punto de generación del hueco y varios nodos de interés en el sistema seleccionado.

Finalmente, se dan las conclusiones que recogen toda la experiencia adquirida y un conjunto de nuevas y prometedoras ideas relacionadas con los huecos de tensión, que amplían la visión del fenómeno y replantean algunas aplicaciones propuestas en la literatura.

* Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Johann F. Petit Suarez. Codirector Víctor Augusto Barrera Núñez.



ABSTRACT

TITLE: VOLTAGE SAGS CAUSES: PROPAGATION OF ANALYSIS.*

AUTHORS:

RUBÉN DARÍO LEAL VERJEL

JHONATAN JÁCOME GUERRERO**

KEY WORDS

Voltage sags, voltage sag propagation, electrical disturbances, Distribution Systems.

DESCRIPTION

In this degree thesis the causes and propagation of voltage events in distribution power networks is analyzed. The waveforms associated with each cause of voltage events is presented and analyzed. The effect caused by the different network components (transformer, motors, capacitors, overhead and underground networks) on voltage and current waveforms is also analyzed.

The IEEE 34 nodes distribution network was selected and characterized using Alternative Transient Program ATP-EMTP. The voltage and current waveforms were analyzed using Matrix Laboratory – MatLab. From the selected distribution network the changes experienced by the voltage/current waveforms due to their propagation throughout the aforementioned components of the distribution network. This degree thesis also describes two fundamental signatures of shunt capacitor bank switching transient phenomena from which one can accurately determine the relative location of an energized capacitor bank whether it is upstream or downstream from the monitoring location, simply evaluating power factor changes and the signs of voltage and current waveform gradients at the switching instant. Additionally, a power quality database has been built. It contains the voltage and current waveforms collected at different interest nodes of the selected IEEE distribution network. This database was built in order to facilitate future event propagation analysis in power networks. Finally, some conclusions, recommendations and future works are given in the last chapter.

* Degree Project: Research Work.

** Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Dir. Johann F. Petit Suarez. Codir. Víctor Augusto Barrera Núñez.



INTRODUCCIÓN

La calidad del servicio de energía eléctrica es un término relacionado con la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión. La tensión que se suministra a una carga o a una instalación está caracterizada por cinco parámetros básicos: frecuencia, magnitud, forma de onda, desbalance y continuidad. La calidad del suministro puede definirse en términos de las desviaciones de estos parámetros de sus valores ideales y de la definición de los valores máximos de desviación, en términos del valor que éstos parámetros puedan alcanzar sin que se afecte el funcionamiento de los equipos eléctricos. La importancia del estudio de los huecos de tensión radica en las grandes pérdidas que generan en la industria y las sanciones económicas que aplican las entidades reguladoras a las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica.

Por lo anterior, los huecos de tensión han cobrado mayor relevancia en los últimos años, ya que es un hecho comprobado que no solo las interrupciones sino también las caídas y subidas del valor eficaz de la tensión son capaces de provocar el mal funcionamiento, e incluso la parada de algunos equipos [1],[2]. Debido al nuevo mercado eléctrico y al aumento en problemas relacionados con la calidad de la energía, las compañías han puesto en marcha programas de supervisión de la red que permiten identificar los fenómenos que ocurren en ella.

Para el caso de Colombia, en materia legal, existe el marco regulatorio de la CREG, el cual a través del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional y el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica (CREG 70/98), describe las pautas bajo las cuales se deben realizar conexiones de cargas, de generadores, operaciones de manejo, de planeación, entre otros.



Este reglamento describe también el nivel de calidad del suministro de la energía eléctrica, apoyándose en los indicadores FES¹ y DES², definiendo los criterios de calidad de la onda de tensión, tales como el intervalo establecido de la frecuencia, la magnitud, entre otros.

Es de gran importancia suministrar este servicio con buena calidad, ya que cualquier interrupción o perturbación puede causar inconvenientes, desde daño de electrodomésticos para usuarios residenciales, hasta grandes pérdidas económicas a causa de interrupciones en la producción para usuarios industriales.

Las causas de los huecos de tensión pueden ser internas o externas. Las causas internas son aquellas producidas por operación de elementos propios de la red, es decir, energización de transformadores/condensadores, arranque de motores, cambios de carga, entre otros. Mientras que las causas externas están asociadas a perturbaciones producidas por agentes externos al sistema de energía, tales como: contacto de las redes con animales o árboles, rayos, ruptura de empalmes, etcétera.

Este trabajo de grado se enmarca dentro de la calidad del servicio abordando el caso de los huecos de tensión, sus causas y su propagación a través de una red de distribución con presencia de motores, transformadores y bancos de condensadores, con el fin de contribuir al estudio de los huecos de tensión. Para el montaje de la red de distribución se utiliza ATP como herramienta de simulación y Matlab para realizar algoritmos que permitan obtener algunos valores de interés.

El presente documento está organizado en cuatro capítulos como se describe a continuación:

En el primer capítulo se presentan las generalidades sobre los huecos de tensión, antecedentes, justificación y los objetivos del proyecto de grado.

¹ Frecuencia equivalente de las interrupciones del servicio.

² Duración equivalente de las interrupciones del servicio.



En el capítulo dos se presenta las características más importantes de los huecos de tensión, su clasificación de acuerdo a su duración, forma y tipo y las causas que lo producen.

En el tercer capítulo se analizará la propagación de huecos de tensión por el sistema de potencia, se estudia el efecto de las líneas, de la impedancia de los transformadores y sus diferentes tipos de conexión en sus devanados. Por último se mira la influencia del motor de inducción cuando se presentan huecos generados por fallas.

En el capítulo cuatro se analiza la propagación de los huecos por una red de potencia seleccionado de la IEEE.

Finalmente se presentan las conclusiones más relevantes del presente proyecto de grado que recogen gran parte de la experiencia adquirida.



1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas el tema de la calidad de suministro de energía eléctrica ha sido estudiado cuidadosamente y es así como se han establecido normativas para los niveles máximos permisibles de perturbaciones. Igualmente, estos estudios han sido de gran acogida por los usuarios de energía, especialmente por los grandes clientes quienes exigen una onda de tensión con excelentes cualidades eléctricas en todo instante de tiempo. El término calidad de suministro, “Power Quality” en inglés, se empezó a utilizar a finales de la década de los ochenta. Con anterioridad este concepto estaba asociado básicamente con la interrupción del suministro. En estos últimos años se ha relacionado, además con otras perturbaciones como: distorsión armónica, huecos de tensión, microcortes, entre otros.

Los huecos de tensión (“sags” para los norteamericanos, “dips” para los europeos) hacen parte del grupo de las variaciones de corta duración y se presentan reducciones de la tensión eficaz entre el 10% y el 90% de la tensión nominal.

Existen multitud de artículos científicos de gran impacto en la IEEE [3], donde se presenta un primer plano del problema de los huecos de tensión. Se realiza también un análisis de algunas de las causas de los huecos de tensión, así como sus características y estadísticas.

Otros trabajos relativos a la caracterización de huecos de tensión son presentados en estudios posteriores [1], [4] y [5], donde se hace uso de las componentes simétricas para la descripción del sistema. En tales investigaciones, se presenta un modelo generalizado del hueco desbalanceado teniendo en cuenta los tipos de fallas y tipos de transformadores. Se plantea como medio de caracterización la tensión compleja remanente, el factor de desbalance PNF y la tensión de secuencia cero.



De manera adicional, el tema de los huecos de tensión ha sido abordado en otros artículos [1], [6] y [7] donde se presentan los factores que afectan la corriente de magnetización en el momento de la energización de transformadores, la influencia de la conexión de los devanados del transformador y los motores de inducción en la propagación de los huecos de tensión.

En la Universidad Industrial de Santander se han planteado trabajos en los que la caracterización y la clasificación de los huecos de tensión han sido el principal objetivo. Un trabajo inicial [8] expone una metodología que permite conocer el tipo de hueco según la causa que lo provocó utilizando como descriptores el voltaje remanente y el factor PNF. Se tiene en cuenta para el desarrollo de la metodología las fallas y el arranque del motor. Los resultados son verificados en simulación de sistemas eléctricos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El estudio de los fenómenos que causan las perturbaciones electromagnéticas en sistemas eléctricos de potencia, brinda información necesaria para mejorar la calidad de la energía eléctrica que se transporta y se distribuye a un gran número de usuarios.

Para esbozar la necesidad de estos estudios, se define la calidad de la potencia eléctrica como: el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo dado y lugar determinado, que tiene el propósito de satisfacer necesidades del cliente, de manera que los requerimientos de calidad son dependientes del tipo de usuario. Además, de la calidad de la potencia, se debe garantizar también la calidad del suministro, la cual comprende desde la disponibilidad y confiabilidad, hasta la continuidad de la energía eléctrica.

Debido a la importancia de proveer una adecuada calidad del servicio de acuerdo con las normas establecidas por la CREG, los operadores de red han concebido bajo el ambiente de calidad de potencia, asegurar un suministro de tensión con



altos niveles de calidad y confiabilidad para el correcto funcionamiento de los equipos electrónicos, los cuales están manejando procesos críticos y de gran importancia para el buen funcionamiento y servicio al cliente que una entidad debe representar para la sociedad colombiana contemporánea.

Este proyecto de investigación en ingeniería eléctrica, pretende contribuir en los estudios de los huecos de tensión y avanzar junto con otros trabajos pertenecientes al grupo de sistemas de energía eléctrica (GISEL), que estarían apoyando una investigación de doctorado “Monitorización de Huecos de Tensión en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica”; en el que se encuentran algunas entidades educativas involucradas como la Universidad Industrial de Santander (Colombia), la Universidad de Girona (España) y la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un amplio término relacionado con la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión es la calidad del servicio de la energía eléctrica, la cual se disminuye al presentarse huecos de tensión en el sistema eléctrico. Los grandes consumidores de energía, aunque contribuyen a la contaminación de la red debido a la conexión de cargas no lineales, son los más interesados en la calidad del suministro, ya que los equipos incluidos en procesos de tipo industrial pueden resultar particularmente susceptibles a problemas con los huecos de tensión, dispositivos de control como computadores, contactores, controladores lógicos programables (PLCs) y circuitos de control de la velocidad de motores, entre otros, pueden ocasionarles grandes pérdidas económicas. Por lo anterior, los huecos de tensión han cobrado mayor relevancia, ya que es un hecho comprobado que no solo las interrupciones sino también las caídas y subidas del valor eficaz de la tensión son capaces de provocar el mal funcionamiento e incluso la parada de algunos equipos [1],[2]. Debido a este nuevo mercado eléctrico y al aumento en problemas relacionados con la calidad de la energía, las compañías han puesto en



marcha programas de supervisión de la red que permiten identificar los fenómenos que ocurren en ella.

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE GRADO

Analizar el comportamiento de los huecos de tensión al propagarse a través de las redes de distribución, desde el punto de localización de la causa, hasta el punto de registro.

Para cumplir este objetivo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar a partir de una revisión bibliográfica las causas de los huecos de tensión y las formas de onda de tensión y corriente asociadas a cada causa identificada.
- Seleccionar un sistema de distribución de prueba (IEEE) y caracterizarlo en la herramienta de simulación ATP Draw, para obtener las formas de onda de tensión y corriente identificadas en el literal anterior.
- Analizar los cambios que experimenta el hueco de tensión a causa de su propagación, desde el punto de generación, hasta el punto de registro.
- Generar una base de datos de huecos de tensión, registrando las formas de onda de tensión y corriente en el punto de generación del hueco y demás nodos de interés.



2. GENERALIDADES DE LOS HUECOS DE TENSION

En este capítulo se analizarán y se presentarán las características básicas más importantes de los huecos de tensión, la clasificación según su duración, forma, tipo y las causas que los producen.

2.1 GENERALIDADES

Según el estándar IEEE³Std 1159, 95. y la norma colombiana NTC⁴ 5000, 02. un hueco de tensión es la reducción del valor eficaz de la tensión entre el 0.1 y 0.9 p.u de su valor nominal, durante 8.33 ms a 1 minuto, caracterizado a la frecuencia industrial.

La Comisión Electrotécnica Internacional (*IEC-CEI*) define el hueco de tensión como la caída repentina del valor eficaz de la tensión entre el 1 y el 90% con una duración entre 10ms y 1 minuto.

Los huecos son a menudo causados por fallas, aumento en la demanda y eventos transitorios tales como arranques de grandes motores o energización de transformadores.

Para dar un valor numérico al hueco de tensión, la forma recomendada de hacerlo es hablar por ejemplo de “un hueco de tensión hasta el 20% del valor normal, no reducida el 20%. En inglés la expresión correcta es “a sag to 20%”. Generalmente las frases “a sag of 20%” ó “a 20% sag” son desaprobadas [9].

Según [10], los huecos de tensión no son tan perjudiciales para la industria como sí lo son las interrupciones. Pero en vista de que hay más huecos que interrupciones, el daño total será mayor. Puesto que la carga puede experimentar un hueco debido a una falla de cortocircuito ocurrida lejos en el sistema de potencia, este problema se considera como “global”.

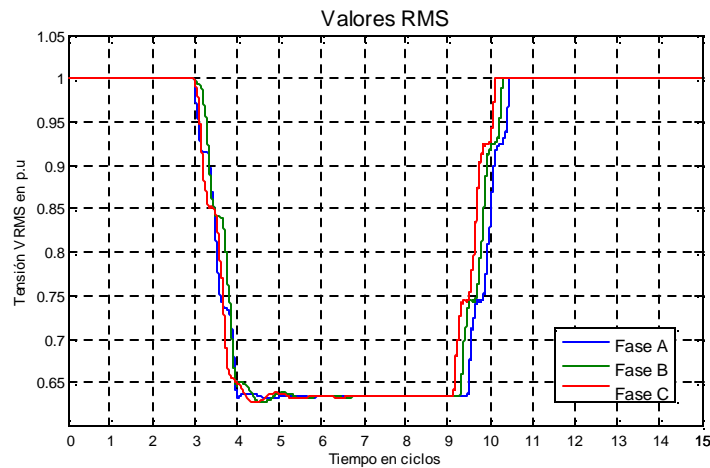
³ Institute of Electrical and Electronic Engineers

⁴ Norma Técnica Colombiana



Un ejemplo de este fenómeno se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1. Valores RMS de un hueco de tensión trifásico con una profundidad de 37% y una duración de 6 ciclos



2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

El análisis de calidad de servicio de una red eléctrica mediante la evaluación de índices requiere la existencia de un conjunto de reglas que permitan homogeneizar la caracterización de un hueco de tensión, independientemente de quien realice las medidas y el análisis [10].

Las principales características que definen un hueco de tensión son su duración y su magnitud. Otras características importantes son: Punto de inicio, punto de recuperación, tensión pérdida, componentes de alta frecuencia, la elevación en la tensión después de la perturbación, entre otras que se describen en [8] y [11].

2.2.1 Magnitud (U_H)

La magnitud del hueco de tensión es la tensión eficaz existente durante el hueco de tensión en por unidad (p.u.) con respecto a la tensión pre-hueco. (En caso de huecos no rectangulares, esta magnitud es función del tiempo).



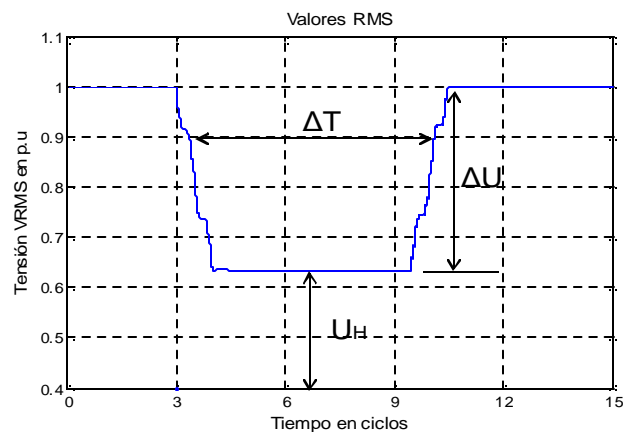
2.2.2 Caída de tensión (ΔU)

Es la diferencia entre la tensión eficaz pre-hueco y la tensión eficaz durante el hueco. (En caso de huecos no rectangulares, también es función del tiempo).

2.2.3 Duración (ΔT)

Tiempo durante el cual la tensión eficaz es inferior al 0.9 p.u. y superior a 0.1 p.u. de la tensión nominal. Debido a que la gran mayoría de los huecos de tensión son ocasionados por cortocircuitos en el sistema eléctrico, es de esperarse que la duración esté determinada principalmente por el tiempo de despeje de la falla. En el ejemplo de la Figura 2, la duración es 116 ms aproximadamente.

Figura 2. UH: Magnitud de la tensión del hueco, U: Caída de tensión del hueco, Δt : Duración del hueco



2.2.4 Salto del ángulo de fase

El salto de ángulo de fase es la diferencia en el ángulo de fase entre la tensión pre-hueco y la tensión durante el hueco (cambio en el cruce por cero de la tensión instantánea). En muchos equipos este salto del ángulo de fase no importa. Sin embargo, por ejemplo los cicloconvertidores electrónicos de potencia que usan información del ángulo de fase para realizar sus disparos de control se ven afectados.

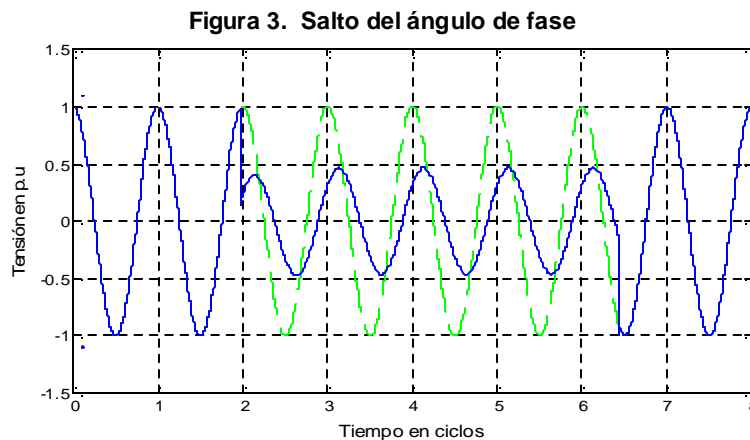
Para obtener el salto de ángulo, es necesario medir el ángulo de fase de la tensión durante el hueco para compararlo con el ángulo de fase de la tensión antes del



hueco; el ángulo de fase de la tensión puede obtenerse a partir del cruce por cero o de la fase de la componente fundamental de la tensión.

Los saltos de los ángulos de fase en fallas trifásicas se deben a la diferencia en la relación X/R entre la fuente y el alimentador y las transformaciones que experimentan los huecos de tensión hacia niveles de tensión más bajos, debidos a los transformadores de potencia.

En la Figura 3 se observa un ejemplo del salto de ángulo que existe entre la tensión de pre-falla y post-falla.



2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Teniendo presente las principales características de los huecos de tensión, se tienen diferentes clasificaciones de los mismos. De acuerdo con su duración forma y tipo:

2.3.1 Según su duración

De acuerdo con su duración y frecuencia de 60Hz, la IEEE Std 1159- 95 y la NTC 5000- 02 los clasifican en:

- a. Instantáneos: su duración está entre 0,5 ciclos (8,33ms) y 30 ciclos (500ms).



- b. Momentáneos: su duración está entre 30 ciclos (500ms) y 3s.
- c. Temporales: su duración está entre los 3s y 1min.

2.3.2 Según su forma

Otra clasificación de esta perturbación se establece de acuerdo con la variación del valor eficaz. Según este parámetro se clasifica en dos formas:

- a. **Hueco rectangular:** son debidos a fallas en el sistema eléctrico las cuales producen un aumento de la corriente y por consiguiente una fuerte caída de tensión en los elementos que componen el sistema, tal como se muestra en la Figura 2.
- b. **Hueco no rectangular:** Son causados por fallas en un sistema eléctrico con cargas rotativa o por el arranque de motores de inducción y energización de transformadores. Figura 27

2.3.3 Según su tipo

La clasificación de los huecos de tensión en sistemas trifásicos, se hace a partir del diagrama fasorial de las tensiones para cada una de las fallas [1]. A continuación se presenta en la Tabla 1 las ecuaciones que definen la tensiones de cada tipo de hueco, así como su respectivo diagrama fasorial. En el anexo A se presenta el análisis que dan origen a diferentes tipos de huecos y en el capítulo 3 se presentan el análisis de la transferencia de estos huecos por transformadores que dan origen a los otros tipos.

Donde $h = 0.5$ es la magnitud del hueco de tensión.

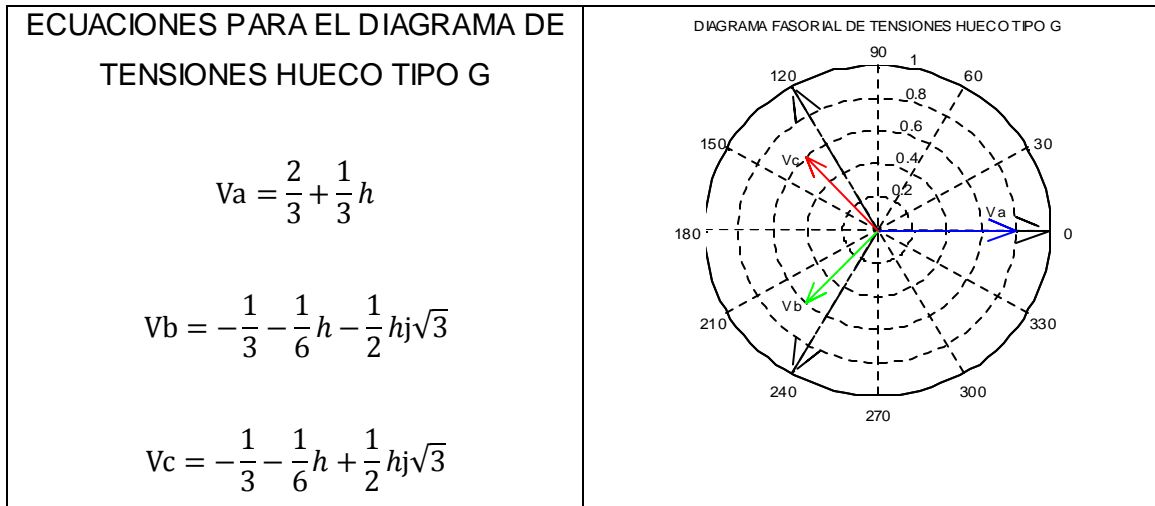


Tabla 1. Tensiones de los diferentes tipos de huecos con su respectivo diagrama fasorial.

<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO A</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO A</p>
<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO B</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO B</p>
<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO C</p> $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO C</p>

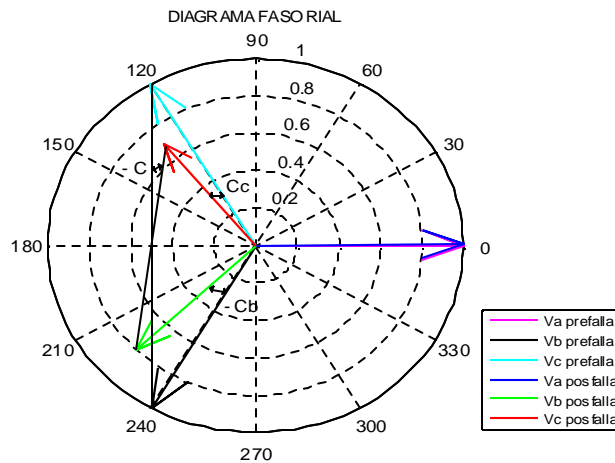


<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO D</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{1}{2}\sqrt{3}h$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{1}{2}\sqrt{3}h$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO D</p>
<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO E</p> $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{1}{2}h\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{1}{2}h\sqrt{3}$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO E</p>
<p>ECUACIONES PARA EL DIAGRAMA DE TENSIONES HUECO TIPO F</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{3}j\sqrt{3}h - \frac{1}{2}h - \frac{1}{6}hj\sqrt{3}$ $V_c = +\frac{1}{3}j\sqrt{3}h - \frac{1}{2}h + \frac{1}{6}hj\sqrt{3}$	<p>DIAGRAMA FASORIAL DE TENSIONES HUECO TIPO F</p>



Los resultados mostrados anteriormente son para casos ideales, sin embargo en la realidad el salto de ángulo de fase no es cero. Por lo tanto, considerando el salto del ángulo en el diagrama fasorial de los huecos tipo C varia levemente como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Diagrama fasorial de tensiones hueco tipo C



Del diagrama fasorial de tensiones en la Figura 4 se puede observar que tanto la magnitud de las tensiones (V_b y V_c), como el salto del ángulo (C_b y C_c) de las tensiones de post-falla son diferentes. Es importante resaltar que la tensión no es la misma en las dos fases en las cuales ocurre la falla.



2.4 CAUSAS DE HUECOS DE TENSIÓN

Como ya se ha mencionado, las causas de perturbaciones eléctricas pueden ser generadas por cortocircuitos o fallas, producidas por agentes externos al sistema de energía y por causas internas, que son aquellas producidas por operación de elementos propios de la red. Sin embargo, las principales causas de los huecos de tensión son las fallas en la red que se presentan en el sistema eléctrico. Para mayor detalle ver anexo B.



3. INFLUENCIA DE LÍNEAS, TRANSFORMADORES Y MOTORES EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

En este apartado se describe la influencia de las líneas, conexión de los devanados de transformadores de potencia y motores de inducción en la propagación de huecos de tensión.

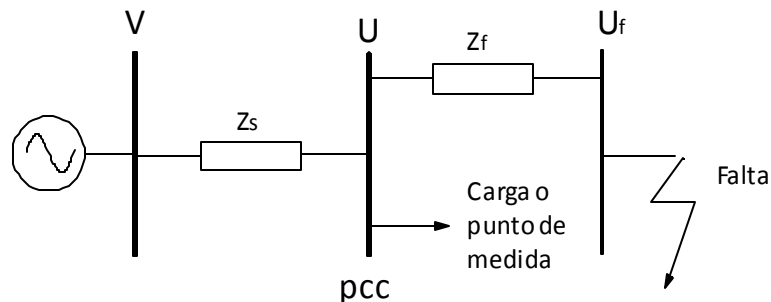
3.1 INFLUENCIA LÍNEAS AÉREAS Y CABLES SUBTERRÁNEOS EN LA MAGNITUD DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Se utiliza el modelo del divisor de tensión que se muestra en la Figura 5 para medir la magnitud de los huecos de tensión [1]. Recibe el nombre de divisor de tensión debido al hecho que cuando se produce un cortocircuito trifásico en el punto f, y despreciando cualquier consumo conectado, la tensión en el punto de conexión común (PCC) es la del divisor formado por Z_{s1} y Z_{f1} .

Este sistema está compuesto por un elemento trifásico activo de tres terminales de impedancias Z_{s0}, Z_{s1}, Z_{s2} y un elemento trifásico pasivo de seis terminales, de impedancias Z_{f0}, Z_{f1}, Z_{f2} . Ver Anexo A.

Se supone que se produce un cortocircuito en el punto f y que se está analizando la tensión en PCC, donde están conectados otros usuarios, bien directamente, o bien a través de transformadores.

Figura 5. Modelo de divisor de tensión



En este modelo se tienen los siguientes elementos y parámetros:



V : es la tensión de la fuente, se asume 1 p.u.

Z_s : es la impedancia de la fuente en el punto de conexión común.

PCC: es el punto de conexión común, desde donde son alimentadas la carga y la falla.

Z_f : es la impedancia entre el PCC y la falla.

La magnitud de la tensión en los terminales de los equipos (carga) corresponde a la tensión en el punto de conexión común (PCC), y esta será llamada V_{hueco} .

$$V_{hueco} = \frac{|Z_f|}{|Z_s + Z_f|} \quad (1)$$

Es así como para sistemas con menores niveles de falla (Z_s grande) y para fallas eléctricamente más cercanas al usuario (Z_f pequeño), el hueco de tensión es más drástico.

Para calcular la magnitud del hueco como una función de la distancia a la falla, se considera que $Z_f = z \cdot l$, y por lo tanto la ecuación (1) se expresa como:

$$V_{hueco} = \frac{|z \cdot l|}{|Z_s + z \cdot l|} \quad (2)$$

Siendo:

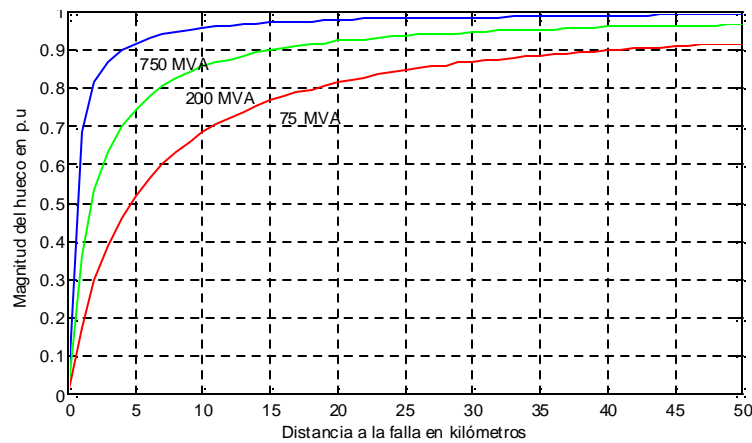
z : La impedancia del alimentador por unidad de longitud

l : La distancia entre la falla y el punto PCC.

En la Figura 6 se muestra la magnitud del hueco de tensión en función de la distancia a la falla, para una línea aérea de 11kV. Se tomó una impedancia de $0.117+j0.315\Omega$ por km para la línea con $S=150\text{mm}^2$ y capacidades de cortocircuito de 750MVA, 200MVA Y 75MVA [1].



Figura 6. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia a la falla para tres niveles de cortocircuito, en una línea aérea de 11kV y $S=150\text{mm}^2$



Como era de esperarse la magnitud del hueco de tensión incrementa (la profundidad del hueco se hace menos severo) cuando incrementa la distancia y el nivel de falla. También se puede observar que una falla a 10km de distancia puede causar un hueco aún severo.

La sección transversal de las líneas y cables tienen influencia en la magnitud de los huecos de tensión; entre más grande sea la sección transversal del alimentador entre PCC y el punto de falla, más pequeña es la impedancia del alimentador y por lo tanto es más severo el hueco de tensión. Esto es más evidente en cables subterráneos que en líneas aéreas, ya que en estas últimas la impedancia es altamente reactiva.

En la Tabla 2 se muestran valores de las impedancias para líneas aéreas y cables subterráneos de 11kV en función de la sección de los conductores.

Tabla 2. Valores de impedancias para líneas aéreas y cables subterráneos de 11kV en función de la sección transversal. Tomado de [1].

Sección transversal (mm^2)	Impedancias (Ω/km)	
	Líneas aéreas	cables subterráneos
50	$0.363+j0.351$	$0.492+j0.116$
150	$0.117+j0.315$	$0.159+j0.097$
300	$0.0061+j0.298$	$0.079+j0.087$



En las Figura 7 y Figura 8 se muestra la influencia de la sección transversal de los conductores en la magnitud del hueco de tensión para líneas aéreas y cables subterráneos de 11kV respectivamente, con una impedancia de la fuente de 200MVA.

Figura 7. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para una línea aérea de 11kV y diferentes secciones transversales

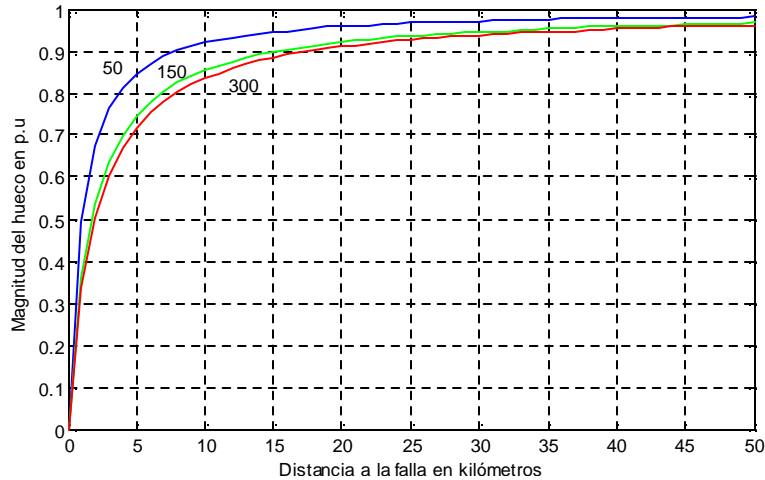
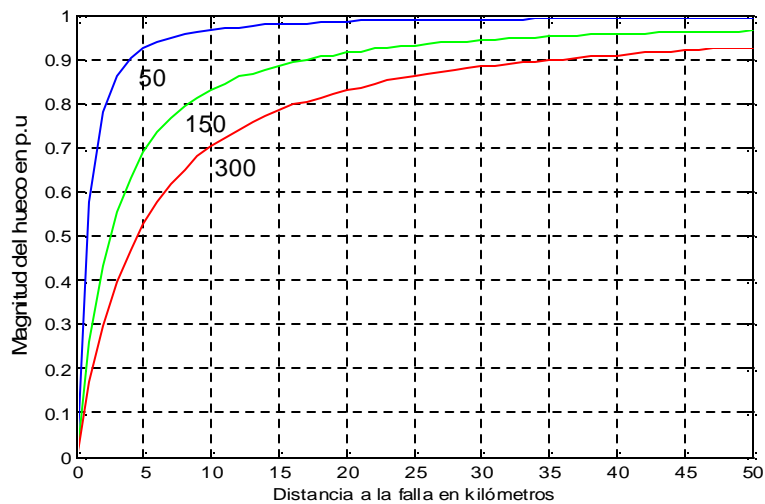


Figura 8. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para cable subterráneo de 11kV y diferentes secciones transversales



Como se mencionó anteriormente al aumentar la sección transversal de los conductores la magnitud del hueco de tensión se hace más severo. Esto se hace más evidente en los cables subterráneos debido a que la parte reactiva de las líneas aéreas son aproximadamente 3 veces más grande que los cables



subterráneos y la componente resistiva tiende a ser la misma y muy pequeña a medida que aumenta la sección transversal, Figura 8.

3.2 EFECTO DE LOS TRANSFORMADORES EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

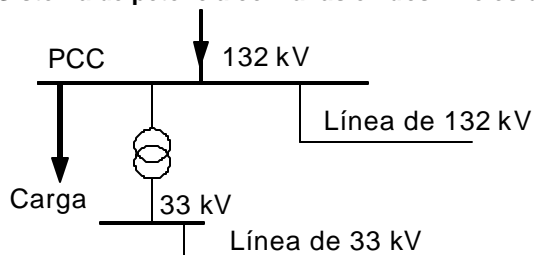
En esta sección se estudia y analiza la influencia de los transformadores en la propagación de los huecos de tensión a través del sistema eléctrico.

3.2.1 Influencia de los transformadores en la magnitud del hueco de tensión

La impedancia entre la falla y el punto PCC, en la Figura 5, no solo consiste en las impedancias de las líneas o cables, también consisten en la impedancia de los transformadores de potencia. Como los transformadores tienen una impedancia bastante grande limitan el nivel del hueco en el lado de bajo voltaje, la presencia de un transformador entre el nodo donde se genera el hueco y el PCC dará poca profundidad al hueco de tensión.

Para mostrar la influencia de los transformadores en la magnitud de los huecos de tensión, se considera la situación mostrada en la Figura 9. Un transformador de 132/33 kV alimenta de la barra de 132 kV y a 33 kV una línea se alimenta del lado de baja del transformador. Los niveles de falla son 3000 MVA en la barra de 132 kV y 900 MVA en la barra de 33 kV. En términos de impedancias la impedancia de la fuente en la barra de 132 kV es 5.81Ω , y la impedancia del transformador es 13.55Ω , ambos referenciados al nivel de 132 kV.

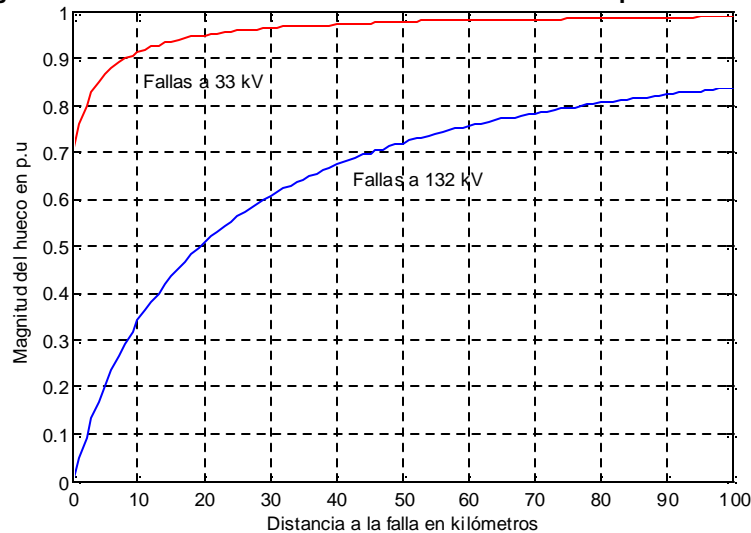
Figura 9. Sistema de potencia con fallas en dos niveles de tensión





Se alimenta el sistema en la barra de 132 kV y se obtiene la magnitud del hueco de tensión utilizando la ecuación (1). Los resultados se muestran en la Figura 10 para un hueco generado por una falla trifásica en la línea de 33 kV y 132 kV. Se puede observar que la magnitud del hueco de tensión debido a una falla en la línea de 33 kV es menos severa que la producida por una falla en la línea de 132 kV. No solo se aprecia que la curva de 33 kV comienza en 0.7 p.u. (debido a la impedancia del transformador) sino que además se eleva mucho más rápido. Esto último es debido al hecho que la impedancia del alimentador vista del lado de 132 kV es $(132/33)^2=16$ veces más grande que la vista del lado de 33 kV.

Figura 10. Magnitud del hueco de tensión en función de la distancia para falla a 33 kV y 132 kV

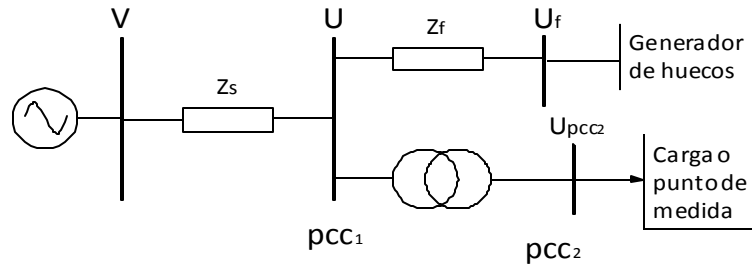


3.2.2 Efecto de la conexión de los devanados del transformador en la transferencia de huecos a otros niveles de tensión.

Con el fin de explicar cómo se transfieren los huecos de tensión en un sistema trifásico desbalanceado de un nivel de tensión a otro, se analizarán las conexiones de los devanados de los transformadores utilizados a nivel de transmisión y distribución en los sistemas eléctricos de potencia. La Figura 11 muestra el esquema básico utilizado para este análisis.



Figura 11. Modelo del hueco de tensión a partir de un divisor de tensión cuando la carga se encuentra en el secundario de un transformador



Los transformadores trifásicos se pueden clasificar en tres tipos en relación con la propagación de los huecos de tensión entre el lado primario y secundario del transformador, estas son:

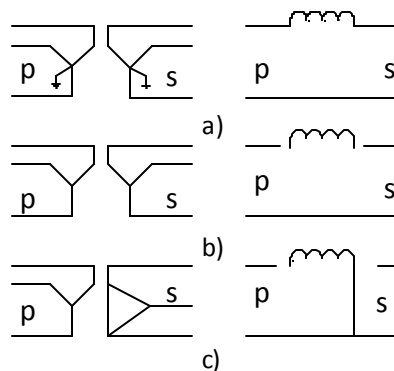
Transformadores tipo T_1 : Son los transformadores en los cuales la tensión secundaria es igual a la tensión primaria en p.u, es el único que no cambia ninguna característica del hueco (Conexión YNyn)

Transformadores tipo T_2 : Son los transformadores que remueven la componente de secuencia cero de la tensión (Conexiones Yy, Dd, Yyn, YNy, Dz)

Transformadores tipo T_3 : Son los transformadores que convierten tensiones de línea en tensiones de fase y viceversa (Conexiones Yd, Dy, YNd, Dyn, Yz)

La Figura 12 ilustra los tres tipos de transformadores y sus respectivos circuitos equivalentes de secuencia cero.

Figura 12. Circuito equivalente de secuencia cero para cada uno de los diferentes tipos de transformadores a) Transformador tipo 1 b) Transformador tipo 2 c) Transformador tipo 3.



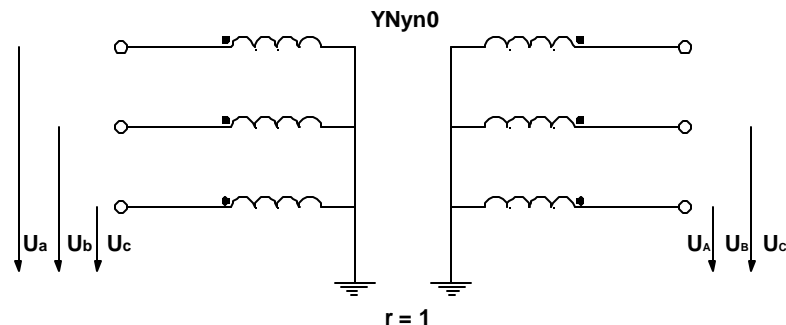


A continuación se determinan las relaciones matriciales entre las tensiones de primario y secundario para cada tipo de transformador:

- **Transformador tipo T₁**

En la Figura 13 se muestra el esquema de un transformador YNyn0 donde la relación de transformación es unitaria ($r_t=1$). Las tensiones del secundario y las del primario están relacionadas según (3).

Figura 13. Esquema de un transformador tipo T₁, conexión YNyn0, y $r_t=1$



$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por lo tanto la matriz de transformación **T₁** viene definida por:

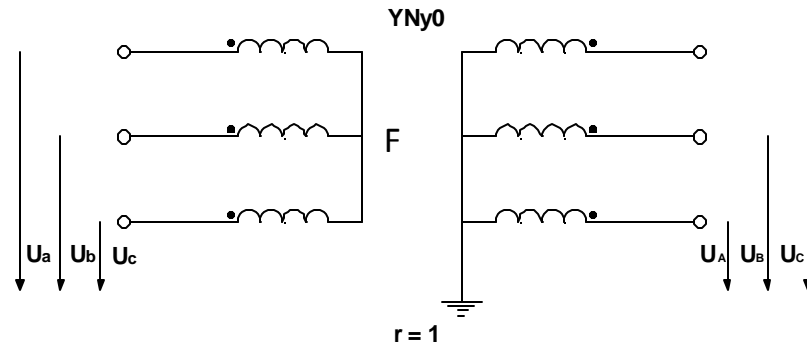
$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- **Transformador tipo T₂**

En la Figura 14 se muestra el esquema de un transformador YNy0 donde la relación de transformación es unitaria ($r_t=1$).



Figura 14. Esquema de un transformador tipo T₂, conexión YNy0, y r_t=1



Las tensiones del secundario y las del primario están relacionadas según:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{aF} \\ U_{bF} \\ U_{cF} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{aF} \\ U_{bF} \\ U_{cF} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

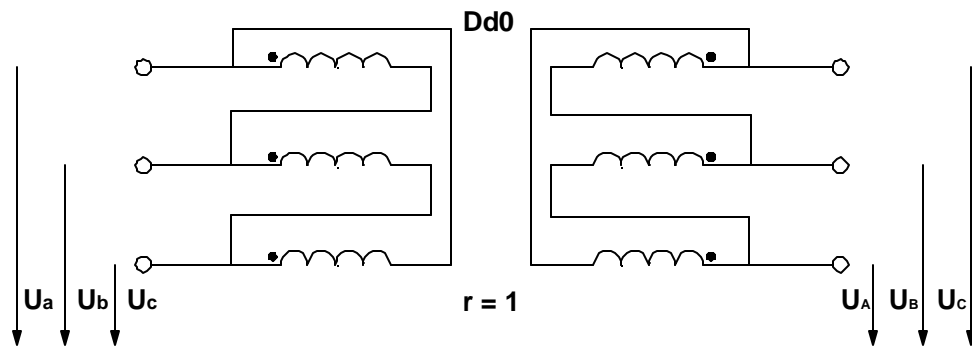
Por lo tanto la matriz de transformación T₂ viene definida por (6) suponiendo que se desprecia la impedancia Z_{m,0} del transformador:

$$\mathbf{T}_2 = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La Figura 15 muestra el esquema de un transformador Dd0 (r_t=1). La relación entre las tensiones del secundario y el primario viene determinada por (7).



Figura 15. Esquema de un transformador tipo T₂, conexión Dd0, y r_t=1



$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Las tensiones U_A , U_B , U_C son indeterminadas ya que el triángulo está flotando respecto a tierra. Conociendo el valor de U_A :

$$\begin{aligned} U_A &= U_A \\ U_B &= U_{BC} + U_C = U_{BC} + U_{CA} + U_A = U_b - U_a + U_A \\ U_C &= U_{CA} + U_A = U_c - U_b + U_A \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = U_A + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix}$$

Si se cumple que:

$$U_A = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_a - U_b - U_c) \quad (9)$$

Se obtiene:



$$\begin{aligned}
 U_A &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_a - U_b - U_c) \\
 U_B &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_a - U_b - U_c) - U_a + U_b = \frac{1}{3} \cdot (-U_a + 2 \cdot U_b - U_c) \\
 U_C &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_a - U_b - U_c) - U_a + U_c = \frac{1}{3} \cdot (-U_a - U_b - 2 \cdot U_c)
 \end{aligned} \tag{10}$$

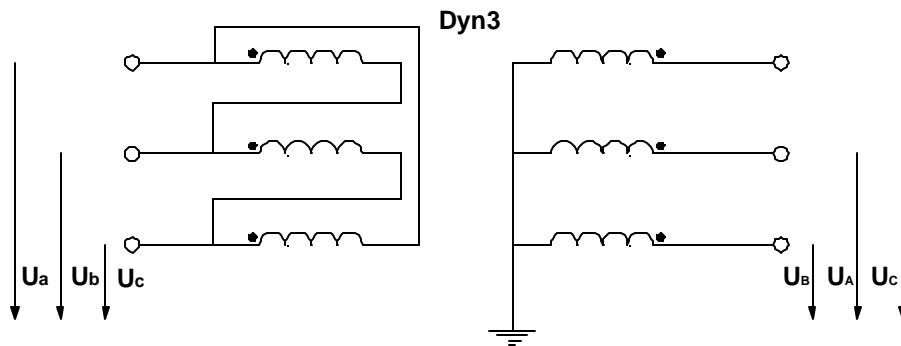
$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \tag{11}$$

• **Transformador tipo T₃**

En la Figura 16 se muestra el esquema de un transformador Dyn3 donde la relación de transformación es unitaria ($r_t = \sqrt{3}$). Las tensiones del secundario y las del primario están relacionadas según:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \tag{12}$$

Figura 16. Esquema de un transformador tipo T₃, conexión Dyn3, y $r_t = \sqrt{3}$



Se ha escogido un $r_t = \sqrt{3}$ para que los módulos de U_A, U_B, U_C sean iguales a los de U_a, U_b, U_c cuando la alimentación sea simétrica.



Como el índice horario del transformador es 3, las tensiones U_A, U_B, U_C estarán retrasadas 90 con respecto a U_a, U_b, U_c cuando la alimentación sea simétrica. Para que estén en fase se multiplica la matriz de transformación por j (para seguir tomando la fase a como referencia).

$$\mathbf{T}_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Existe la siguiente relación entre las matrices T_2 y T_3 .

$$T_2 = T_3^2 \quad (14)$$

Lo que equivale a decir que dos transformadores Dy en cascada son equivalentes a un transformador Dd o que dos transformadores Yd en cascada equivalen a un transformador Yy.

3.2.2.1 Transferencia de huecos de tensión generados por fallas eléctricas

Para corroborar con lo teórico que se explica a continuación, se modeló el circuito de la Figura 11 en ATP (Alternative Transients Program) que incluye un generador de huecos, desarrollado por los autores de esta tesis, para obtener un hueco en el punto de conexión común, PCC_1 , que corresponde al lado primario del transformador. Para la simulación se colocó una carga en Y en el secundario del transformador de valor muy alto para que simulara un circuito abierto y no se presentaran problemas en la simulación en ATP (100.000 Ω). La impedancia de la fuente es puramente reactiva de valor $j0.605 \Omega$ y la impedancia del alimentador de $0.351+j0.945\Omega$. El transformador es ideal con una relación 1:1, En la Figura 17 se presenta el modelo en ATP. Cuando se utiliza un tipo de transformador se utiliza las siguientes conexiones:

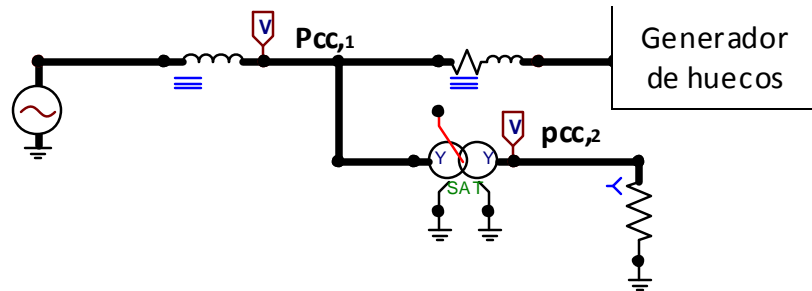
Transformador tipo 1: En este tipo de transformadores solo hay un tipo de conexión como se mencionó anteriormente la YNyn.



Transformador tipo 2: Se utilizó la conexión Dd.

Transformador tipo 3: Se utilizó la conexión Dy3.

Figura 17. Modelo base para el estudio simulado en ATP.



3.2.2.1.1 Transferencia de huecos tipo B

A continuación se analiza la transferencia de huecos de tensión tipo B a otros niveles de tensión, en función del tipo de transformador. En el generador de huecos se produce una falla monofásica para obtener un hueco tipo B en el lado primario del transformador, punto de conexión común, PCC1 y obtener los resultados en PCC2.

- **Transformador tipo T₁:**

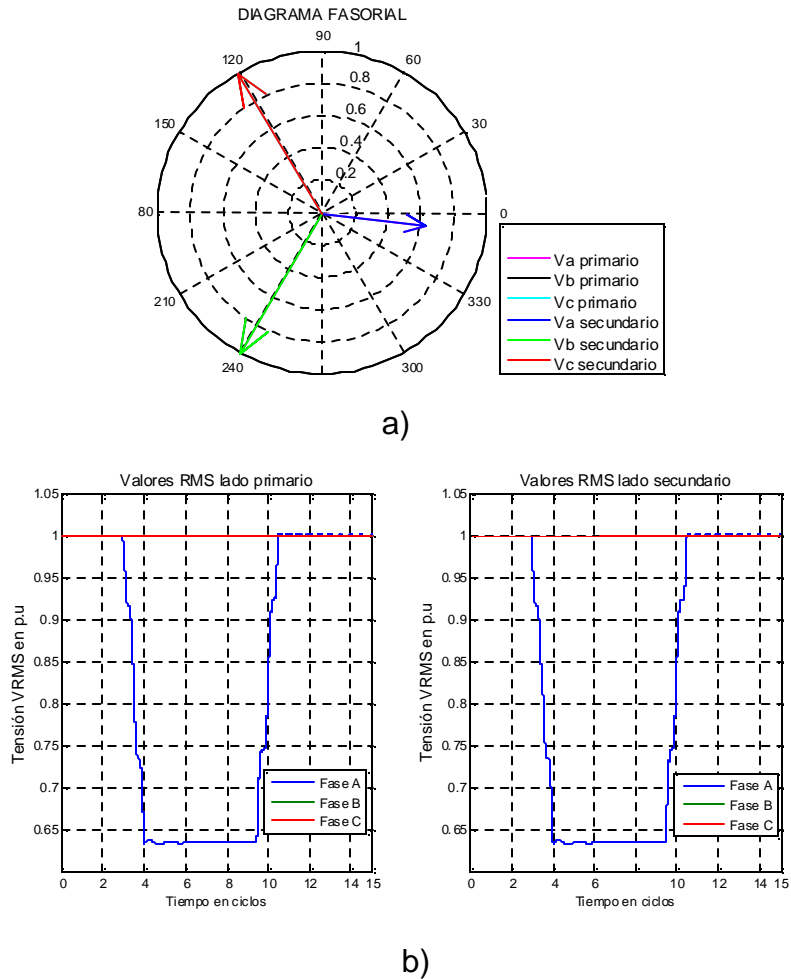
Aplicando las matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

Una carga en estrella con neutro situada en el secundario de un transformador tipo T1, en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo B, se ve sometida a un hueco de la misma tipología, es decir Tipo B, ver ecuación (15) y Figura 18.



Figura 18. Transferencia hueco tipo B por un transformador T1 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario



• **Transformador tipo T₂:**

Aplicando las matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot V \quad (16)$$

Operando:



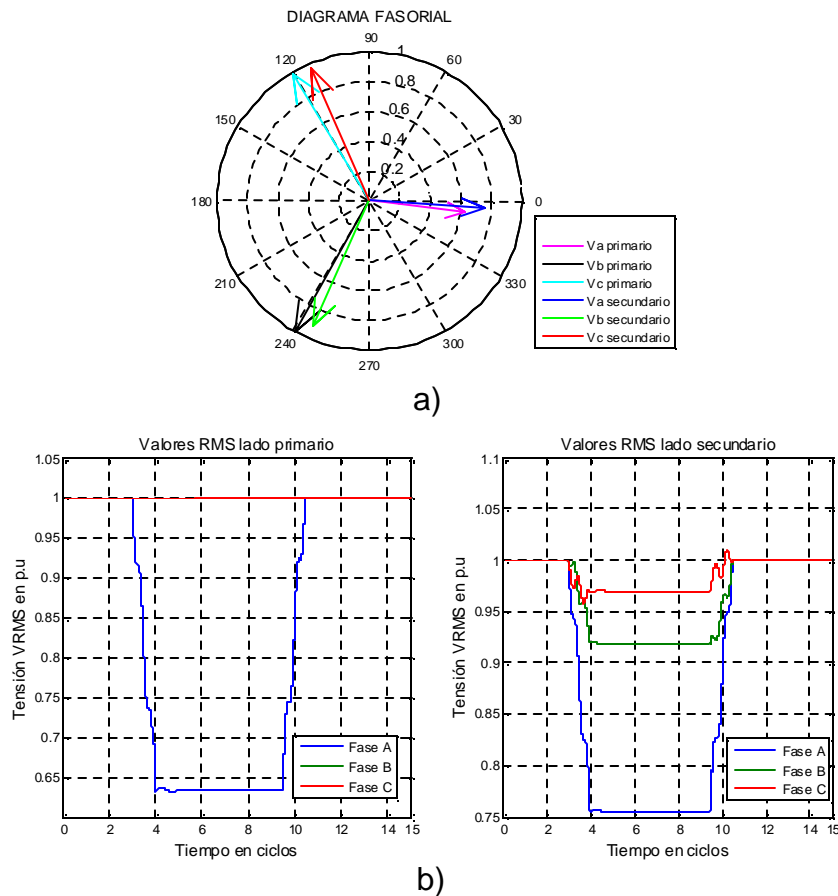
$$U_A = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot h + 1) \cdot V$$

$$U_B = \left(-\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot h + 1) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot V$$

$$U_C = \left(-\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot h + 1) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot V$$
(17)

Analizando los resultados obtenidos, se obtienen unas ecuaciones muy similares a las obtenidas para huecos tipo D, Figura 19. De hecho, las ecuaciones obtenidas en (17) se denominan Tipo D* en [1].

Figura 19. Transferencia hueco tipo B por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario

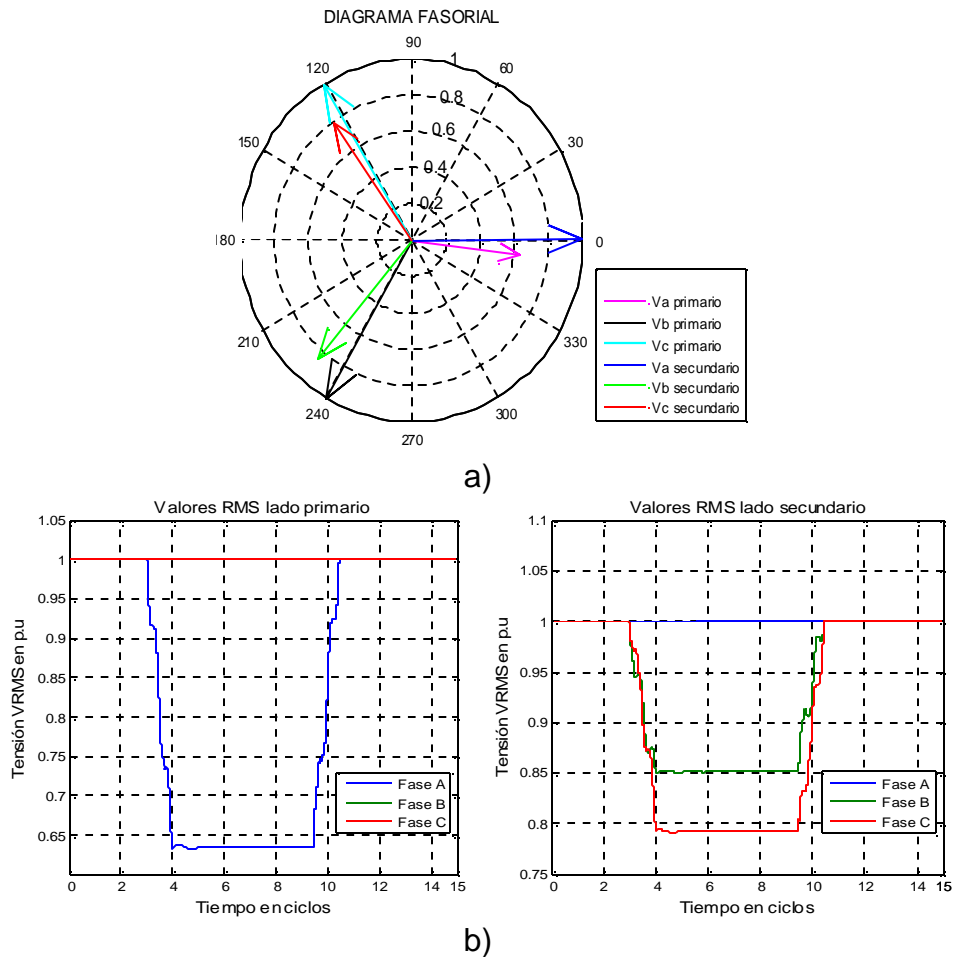




• **Transformador tipo T₃:**

Como este tipo de transformador permuta tensiones de línea y tensiones fase–neutro, cuando se produce un hueco tipo B en el primario, se tendrá un hueco Tipo C* en el secundario del transformador. Como en el caso analizado en el apéndice A6 en el que una carga conectada en triángulo se veía sometida a un hueco tipo B.

Figura 20. Transferencia hueco tipo B por un transformador T3 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario



3.2.2.1.2 Transferencia de huecos tipo C

A continuación se analiza la transferencia de huecos tipo C a otros niveles de tensión, en función del tipo de transformador:



En el generador de huecos se produce una falla línea-línea para obtener un hueco tipo C en el lado primario del transformador, punto de conexión común, PCC₁ y obtener los resultados en PCC2.

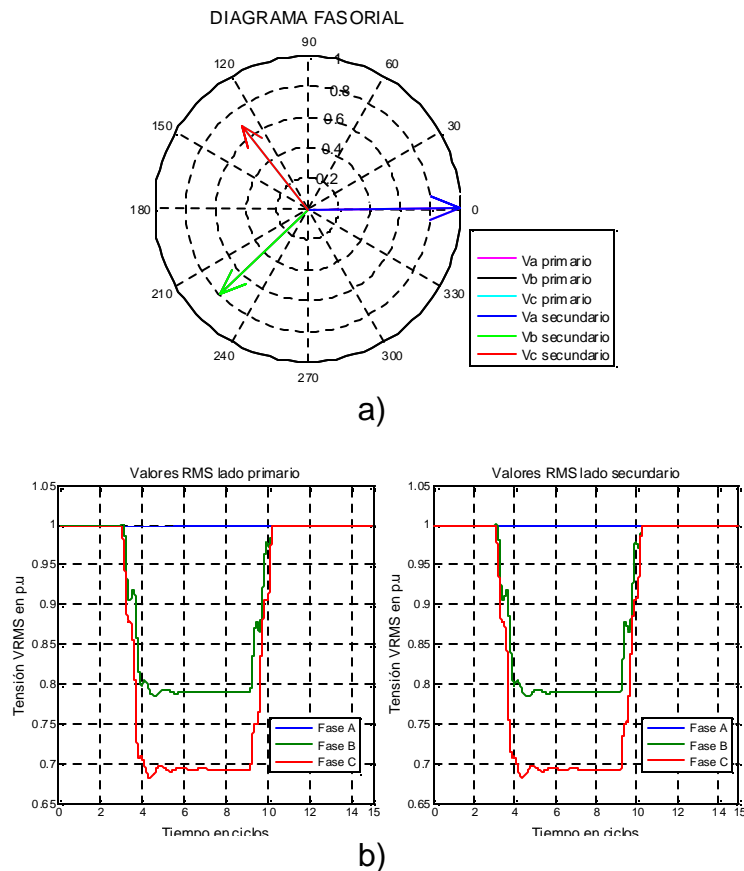
• **Transformador tipo T₁:**

Aplicando las matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

Una carga en estrella con neutro situada en el secundario de este transformador, en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo C, se ve sometida a un hueco de la misma tipología, es decir Tipo C, Figura 21.

Figura 21. Transferencia hueco tipo C por un transformador T1 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario





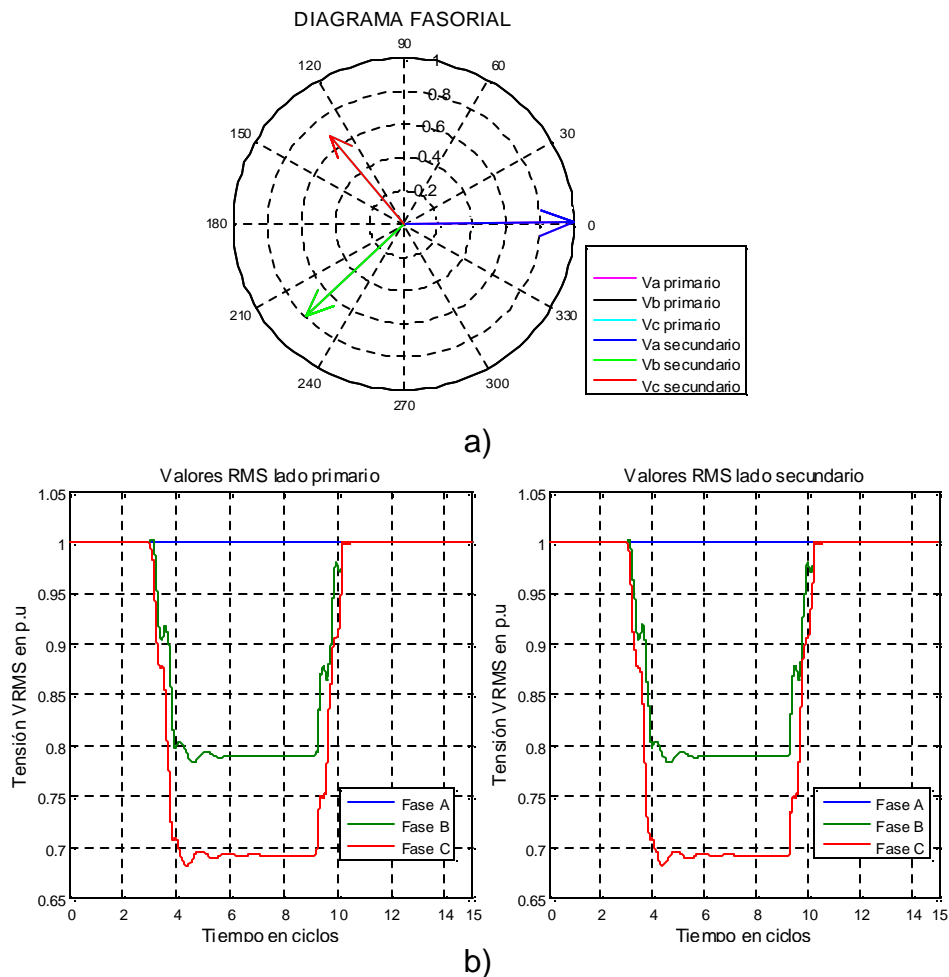
• **Transformador tipo T₂:**

Aplicando las matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V \quad (19)$$

En el secundario se sigue teniendo un hueco Tipo C (no presenta componente de secuencia cero).

Figura 22. Transferencia hueco tipo C por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario

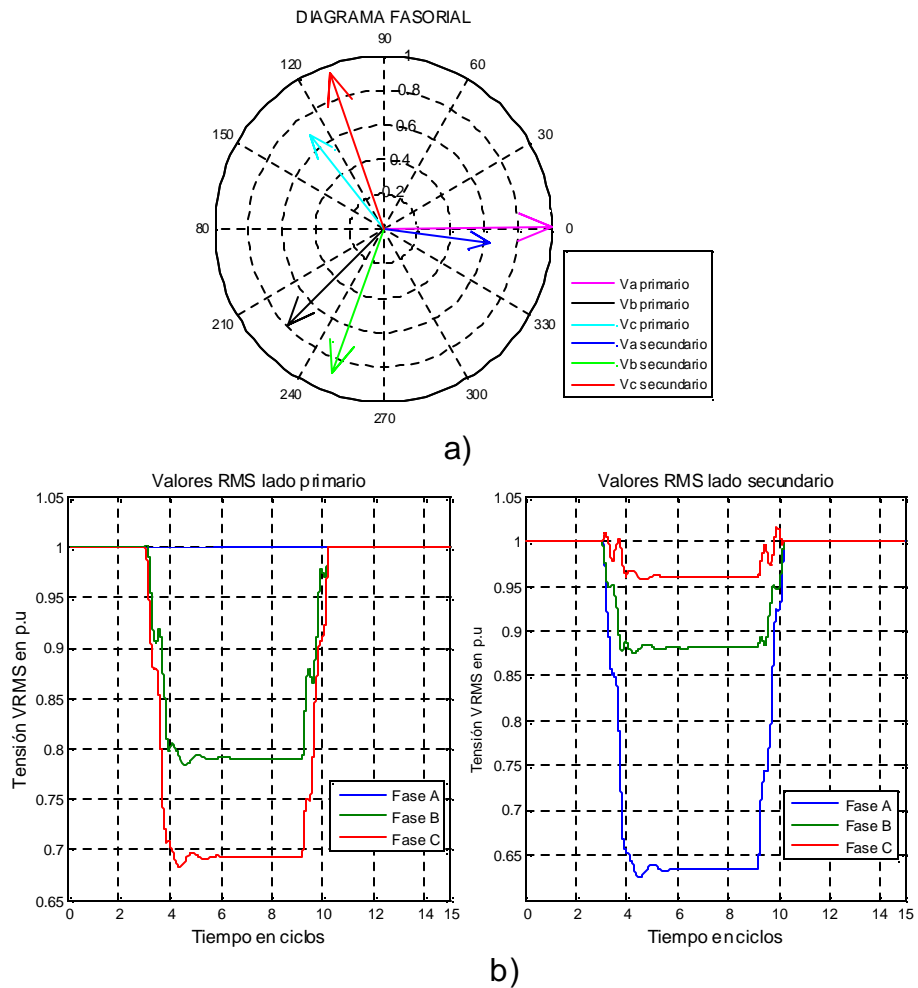




• **Transformador tipo T₃:**

Cuando se produce un hueco tipo C en el primario, se tendrá un hueco tipo D en el secundario del transformador. Como en el caso analizado en el anexo A6 de una carga conectada en triángulo sometida a un hueco tipo C.

Figura 23. Transferencia hueco tipo C por un transformador T3 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario b) Tensión Vrms en el lado primario y secundario.



3.2.2.1.3 Transferencia de huecos tipo E

A continuación se analiza la transferencia de huecos tipo E a otros niveles de tensión, en función del tipo de transformador:



En el generador de huecos se produce una falla línea-línea tierra para obtener un hueco tipo E en el lado primario del transformador, punto de conexión común, PCC₁ y obtener los resultados en PCC₂.

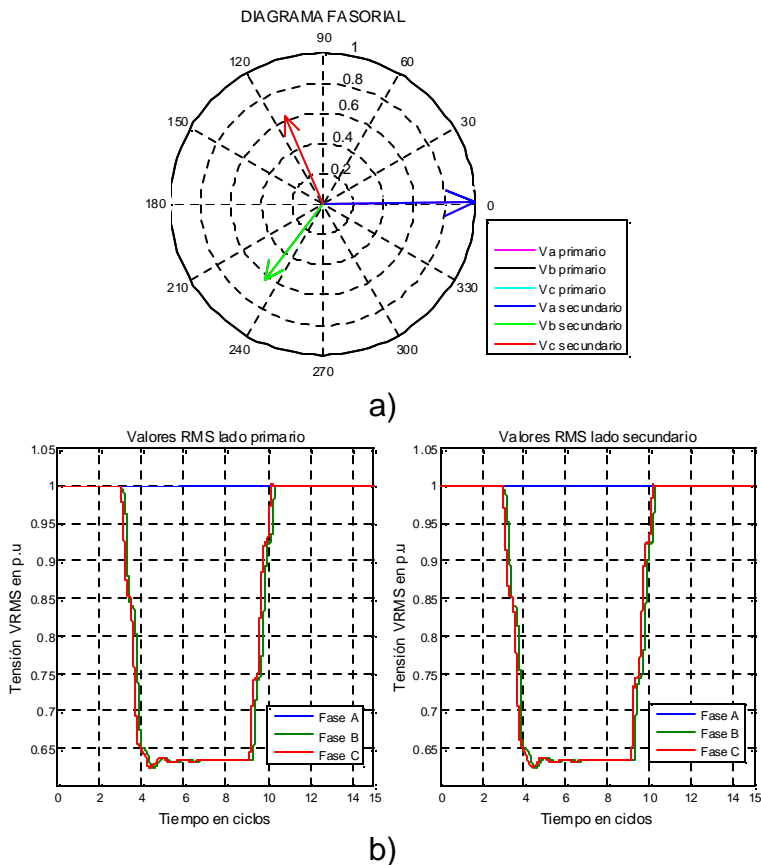
• **Transformador tipo T1:**

Aplicando las matrices de transformación:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

Una carga en estrella con neutro conectada al secundario de este transformador, en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo E, también se ve sometida a un hueco Tipo E, Figura 24.

Figura 24. Transferencia hueco tipo E por un transformador T1 b) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario





• **Transformador tipo T₂:**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene:

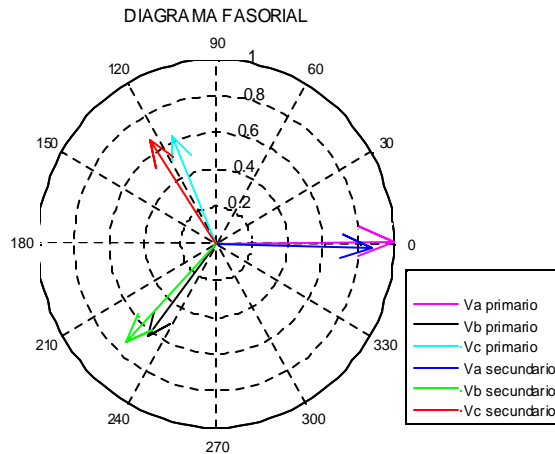
$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \cdot h \\ a \cdot h \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2 + h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2 + h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2 + h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V \quad (21)$$

Las ecuaciones obtenidas en la ecuación (21) son las que corresponden a huecos Tipo G. La tensión para este nuevo tipo de hueco en componentes simétricas es:

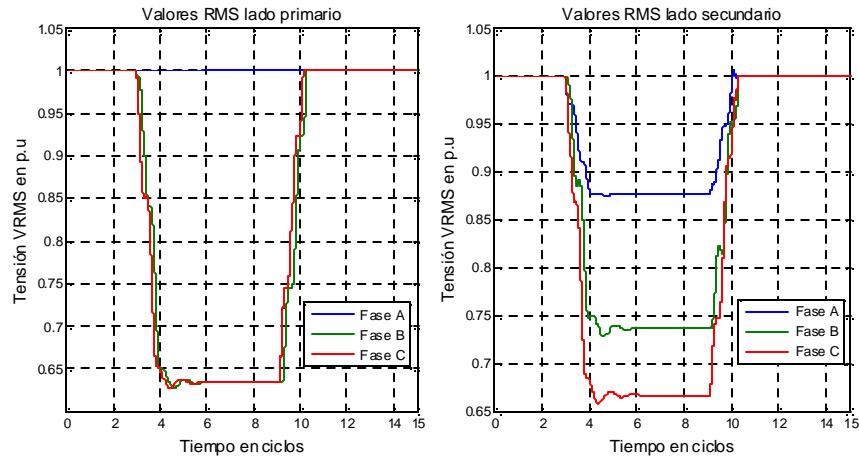
$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 + 2 \cdot h \\ 1 - h \end{bmatrix} \cdot V \quad (22)$$

Una carga en estrella con neutro conectada al secundario de este transformador, en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo E, se ve sometida a un hueco Tipo G, Figura 25.

Figura 25. Transferencia hueco tipo E por un transformador T2 a) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario



a)

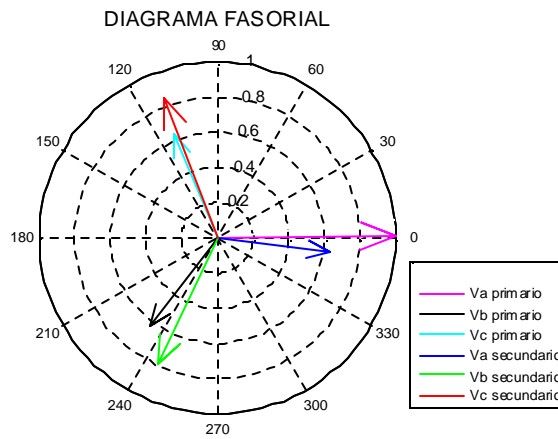


b)

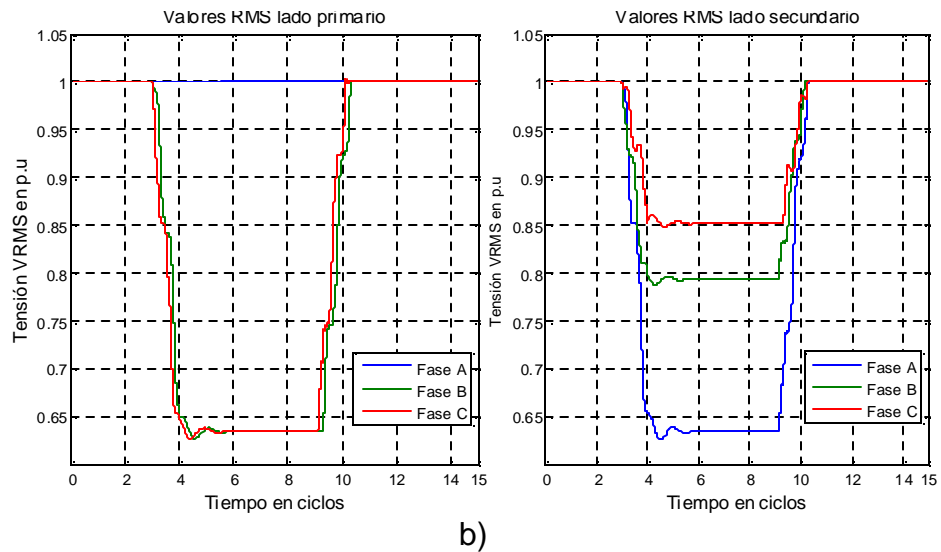
• **Transformador tipo T3:**

Es el caso análogo al de una carga conectada en triángulo que se ve sometida a un hueco tipo E. Por tanto, en este caso se tendrá un hueco Tipo F en el secundario del transformador, Figura 26. Anexo A.6.

Figura 26. Transferencia hueco tipo E por un transformador T3a) Circuito en ATP b) Diagrama fasorial en el lado primario y secundario c) Tensión Vrms en el lado primario y secundario



a)



3.2.2.2 Transferencia de huecos de tensión generados por fallas eléctricas a través de dos transformadores

Hasta el momento se ha comprobado que al transferir huecos de tensión tipos A, B, C y E a través de un transformador, en el secundario del mismo se pueden observar huecos tipos D, F y G. Por tanto, es necesario analizar qué ocurre cuando estas nuevas tipologías de huecos de tensión son transferidas a otros niveles de tensión mediante otros transformadores.

3.2.2.2.1 Transferencia de un hueco tipo D

Se analizará la transferencia del hueco tipo D, en función del transformador

- **Transformador tipo T_1 :**

Una carga en estrella con neutro conectada en el secundario de un transformador de tipo T_1 , en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo D, se ve sometida a un hueco Tipo D.

- **Transformador tipo T_2 :**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene el valor de la tensión (23), donde no se observa cambio. Por lo tanto, puesto que este tipo de hueco no



presenta componente de secuencia cero, en el secundario del transformador se tiene un hueco Tipo D.

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot V \quad (23)$$

- **Transformador tipo T₃:**

Es el caso opuesto al de una carga conectada en triángulo que se ve sometida a un hueco tipo C, la cual ve un hueco tipo D. Por tanto, en este caso se tendría un hueco Tipo C en el secundario del transformador.

3.2.2.2 Transferencia de un hueco tipo F

Se analizara la transferencia del hueco tipo F, en función del transformador

- **Transformador tipo T₁:**

Una carga en estrella con neutro conectada en el secundario de un transformador de tipo I en cuyo primario se produce un hueco tipo F, se ve sometida a un hueco de Tipo F.

- **Transformador tipo T₂:**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot V \quad (24)$$

Es decir, no se observa cambio y en el secundario del transformador se tiene un hueco Tipo F, puesto que éste no presenta componente de secuencia cero.



- **Transformador de tipo T₃:**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene (25). Por tanto el secundario se ve sometido a un hueco Tipo G.

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V \quad (25)$$

Como este transformador permuta tensiones de línea y de fase, éste es el caso opuesto al de una carga conectada en triángulo cuando se ve sometida a un hueco tipo E, la cual observa un hueco tipo F. Sin embargo, como el hueco tipo E tiene componente de secuencia cero, ésta no se puede generar, por lo que aparece un hueco tipo E pero sin componente de secuencia cero, es decir, un hueco tipo G.

3.2.2.2.3 Transferencia de un hueco tipo G

Se analizara la transferencia del hueco tipo F, en función del transformador

- **Transformador de tipo T₁:**

Una carga en estrella con neutro conectada en el secundario de un transformador de tipo I en cuyo primario se produce un hueco de tensión tipo G, se ve sometida a un hueco Tipo G.

- **Transformador de tipo T₂:**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene:



$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V
 \end{aligned} \tag{26}$$

Es decir, no se observa cambio y en el secundario del transformador se tiene un hueco Tipo G, puesto que éste no presenta componente de secuencia cero.

- **Transformador tipo T3:**

Aplicando las matrices de transformación se obtiene:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot V \tag{27}$$

Por tanto, el secundario se ve sometido a un hueco Tipo F. Este caso es el opuesto al de un hueco de tipo F en el primario de un transformador de tipo III, que se transforma en un hueco de tipo G en el secundario.

3.2.2.3 Observaciones y análisis de las transferencia de los huecos generados por fallas eléctricas

Del estudio realizado en el presente capítulo se pudo observar que los huecos de tensión mientras se propagan por el sistema eléctrico, alteran sus características no solo debido a la impedancia entre el origen del evento y la carga, sino también



al tipo de conexión de los transformadores a través del cual se propagan a lo largo de la red. Por tanto las características de los huecos de tensión en las barras de las cargas son muy diferente a los que les dio origen.

La Tabla 3 muestra el tipo de hueco a que se ve sometida una carga en estrella a tierra, conectada en el secundario de un transformador, cuando en el primario del transformador se producen los siete tipos de huecos.

Tabla 3. Transferencia de huecos a otros niveles de tensión

Transformador		Hueco en el primario del transformador						
Tipo	Conexiones	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
T1	YNyn	A	B	C	D	E	F	G
T2	YyDdDz	A	D*	C	D	G	F	G
T3	Dy Yd Yz	A	C*	D	C	F	G	F

C* y D* indica que la magnitud del hueco no es igual a h , pero puede ser igual a $1/3+2/3h$

La influencia de la conexión de los devanados del transformador en la propagación de los huecos de tensión se puede observar cuando la perturbación contiene componente de secuencia cero y la conexión del devanado bloquea el flujo de esta componente de secuencia. En los huecos de tensión que no contienen componente de secuencia cero, porque ese tipo de hueco de tensión tiene origen de un cortocircuito que no implica la tierra, la influencia en este caso es debida a los cambios de fases impuesto por el transformador tipo 3.

Una característica importante sobre los transformadores tipo 2 es que estos transformadores ayudan a mantener la magnitud de los huecos de tensión en el lado secundario, por encima de 33% si existe un hueco de tensión con magnitud cero, es decir, una interrupción momentánea en el lado primario.

Estos resultados muestran la importancia de las conexiones de los transformadores utilizados en el sistema hasta el consumidor final y en qué medida el fenómeno se propaga a través de la red. Las características de los



huecos de tensión en los terminales de la carga varían según el tipo de conexión del transformador, tipo de conexión de la propia carga y las impedancias involucradas en el cortocircuito del punto de acoplamiento común hasta la carga.

3.2.2.4 Transferencia de huecos de tensión generados por operación de elementos propios del sistema

Para el análisis de transferencia de estos huecos de tensión se utilizó el modelo de la Figura 17 y se generaron huecos causados por energización de transformadores y arranque de motores con el generador de huecos.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Al transferir huecos de tensión generados por arranque de motores y energización de transformadores a través de transformadores tipo T1 y tipo T2 estos no influyen en la propagación del hueco, es decir sus características en el lado primario y lado secundario son las mismas Figura 27. Como se ha mencionado anteriormente el transformador tipo 2 elimina la componente de secuencia cero, el hecho de que no cambie las características implica que estos tipos de huecos no tienen componente de secuencia cero.
- Al transferir estos tipos de hueco por un transformador tipo T3 se puede observar que hay una diferencia en el hueco tensión del lado primario con el del lado secundario del transformador Figura 28. La forma es la misma pero debido al desfase que impone el transformador T3 y al desbalance que existe en las tensiones, en el momento de la perturbación (11 ciclos), la magnitud de las fases en el primario no coinciden con las del secundario debido a que la fase que se encuentra a su nivel máximo de tensión instantánea en el momento de la perturbación, es la fase que menos presenta caída, contrario a la fase que se encuentra cercana o en 0 de tensión que será la que presenta mayor caída de tensión.



Figura 27. Hueco de tensión por transformador tipo T1 y T2 a) Causado por la energización del transformador b) Causado por el arranque del motor

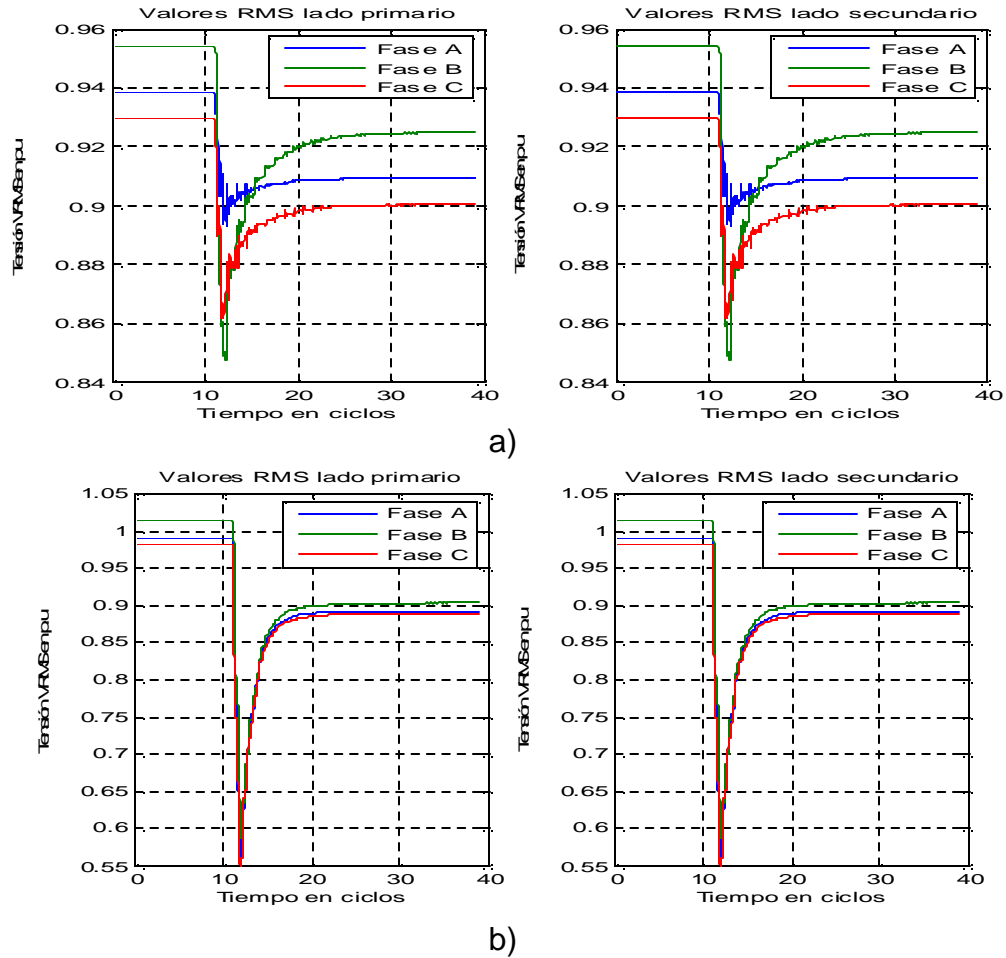
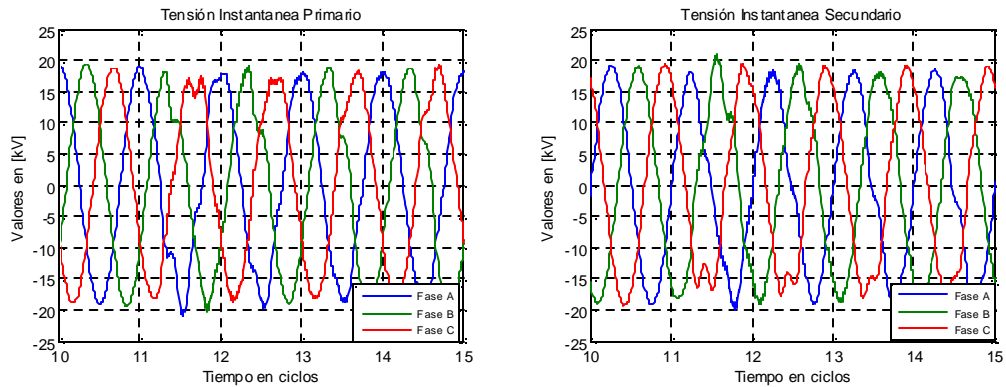
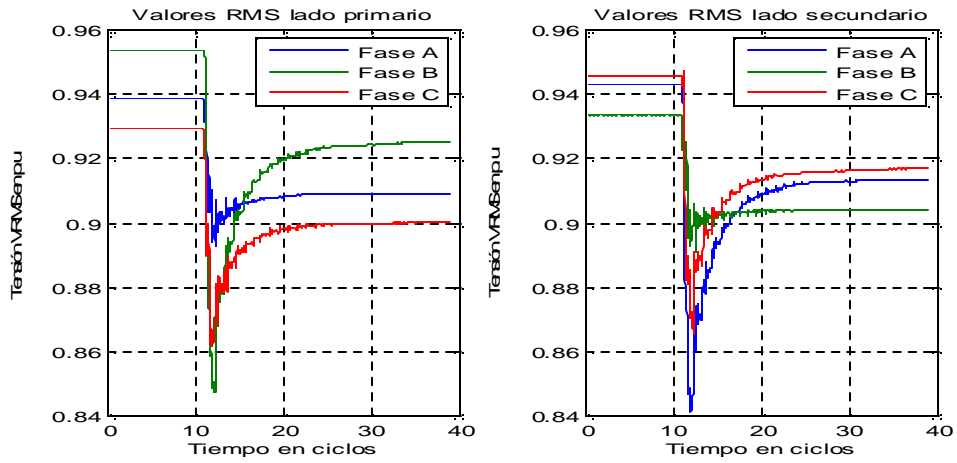
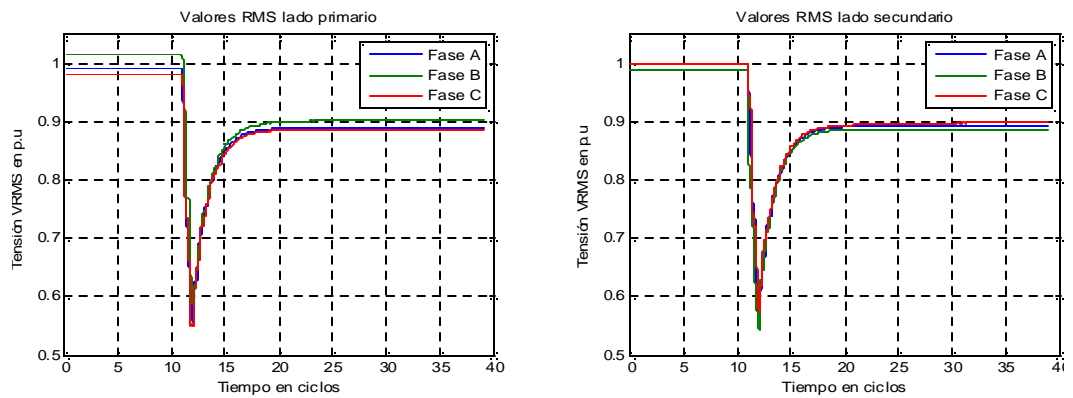
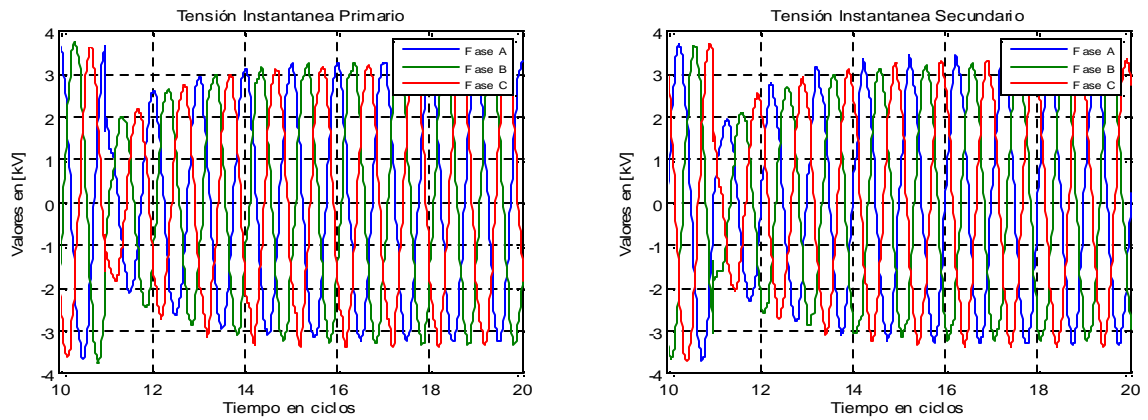


Figura 28. Hueco de tensión por transformador tipo T3 (Dy3) a) Causado por la energización del transformador b) Causado por el arranque del motor





a)



b)



3.3 INFLUENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS CAUSADOS POR FALLAS [8].

3.3.1 Falla trifásica

Cuando se presenta una falla trifásica en el sistema eléctrico, la magnitud de la tensión en los terminales del motor decrece y las consecuencias de esta caída de tensión son las siguientes:

- El flujo magnético en el entrehierro está en desbalance respecto a la tensión del estator. El flujo decae con una constante de tiempo de hasta varios ciclos. Durante esta caída, el motor contribuye a la falla y la tensión en sus terminales se mantiene.
- La caída de la tensión da origen a una caída en el torque eléctrico, debido a que el torque eléctrico es proporcional a la tensión al cuadrado del valor eficaz de la tensión. El torque mecánico permanece igual por largo tiempo; por lo tanto, el motor se desacelera. Mientras el motor se desacelera, toma una corriente mayor con un factor de potencia menor; esto produce una caída de tensión aún mayor. Para caídas de tensión pequeñas, se puede alcanzar un nuevo estado estable a una velocidad menor, dependiendo del torque resistente de la carga mecánica. Para caídas de tensión profundas el motor continuará desacelerándose hasta detenerse o hasta que la tensión se recupere. Como la constante de tiempo mecánica es del orden de un segundo o más, el motor normalmente no alcanzará la velocidad cero.

En el momento en el que se recupera la tensión, ocurre lo contrario. El flujo en el entrehierro aumenta de nuevo, lo cual causa una gran corriente interna que retrasa la recuperación de la tensión. Luego el motor se re acelera hasta alcanzar su velocidad pre-hueco, tomando nuevamente una gran corriente con factor de potencia pequeño; esto da origen a un hueco de tensión post-falla de duración considerable.



La contribución del motor de inducción a la falla puede modelarse con una fuente de tensión en serie con una reactancia. La fuente tiene generalmente un valor de 1 p.u. en el inicio de la falla y decae con la constante de tiempo del subtransitorio. La reactancia está entre el 10% y 20%, y corresponde a la reactancia de dispersión.

Para evaluar el incremento de la corriente del motor después de la falla, se utiliza el circuito equivalente del motor de inducción, el cual consta de la conexión en serie de la resistencia del estator R_S , la reactancia de dispersión X_L y la resistencia del rotor que depende del deslizamiento R_r/s (s es el deslizamiento del motor). La impedancia del motor es igual a:

$$Z_M = R_S + jX_L + \frac{R_r}{s} \quad (28)$$

Si un motor de inducción grande está conectado a un sistema robusto, se ven efectos similares pero más leves que en otros sistemas.

3.3.2 Fallas desbalanceadas

El comportamiento de un motor de inducción durante una falla desbalanceada, es más complejo; solamente utilizando programas de análisis de redes se puede tener efectos cuantitativos precisos. La interacción entre el sistema y el motor de inducción durante una falla desbalanceada es la siguiente:

- Durante el primer o segundo ciclo después del inicio de la falla, el motor contribuye a la falla; esto origina un incremento en la tensión de secuencia positiva. Las tensiones de secuencia negativa y cero no se ven influenciadas.
- El motor se desacelera causando una caída en la impedancia de secuencia positiva; esto hace que la corriente se incremente y que la tensión de secuencia positiva se decremente.
- Como la impedancia de secuencia negativa del motor es baja (entre el 10% y el 20% de la impedancia nominal de secuencia negativa) la tensión de secuencia negativa debido a la falla se amortigua en los terminales del motor.



La impedancia de secuencia negativa es independiente del deslizamiento; esto hace que la tensión de secuencia negativa permanezca constante durante el evento.

- El motor de inducción no toma corriente de secuencia cero, por lo tanto, la tensión de secuencia cero no es influenciada por el motor.

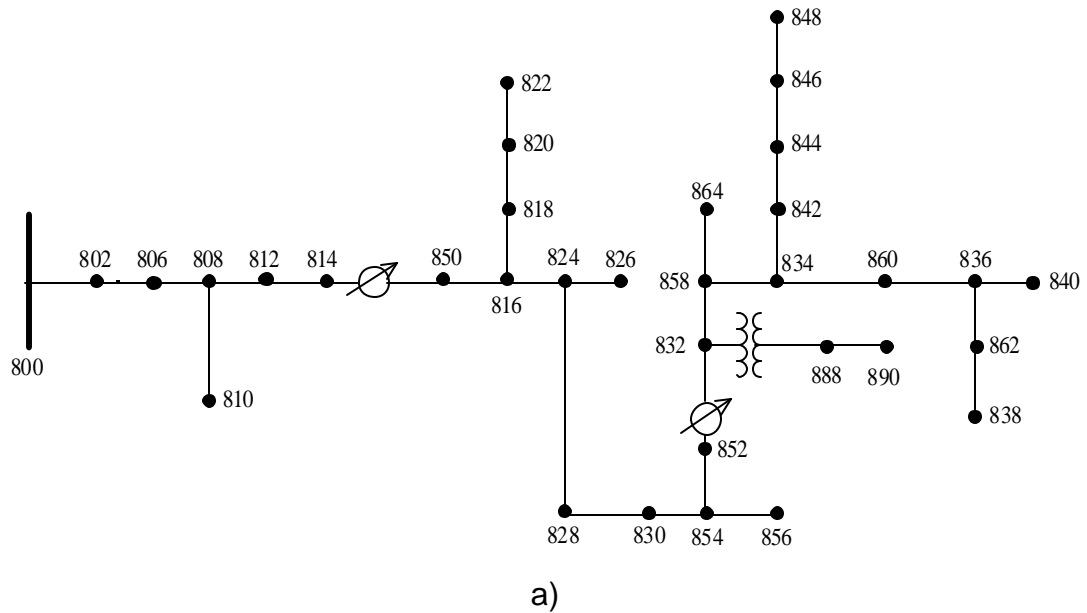


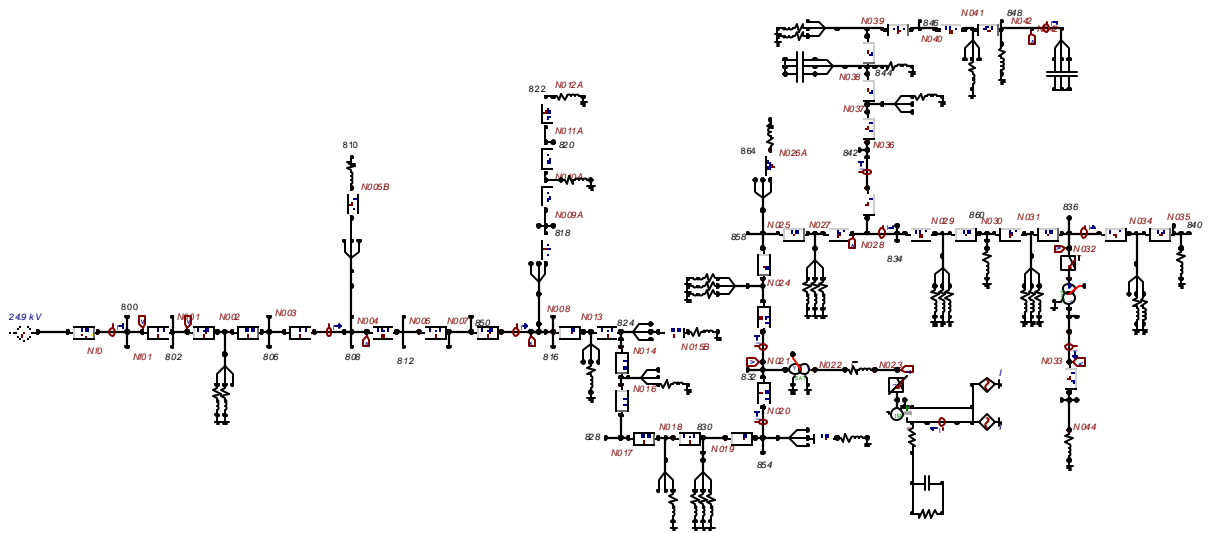
4. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

En este capítulo se analiza la propagación de huecos de tensión debidos a arranques de motores, energización de transformadores, energización de bancos de condensadores y fallas de red en un sistema de distribución de 34 barras seleccionado y propuesto por la IEEE.

El sistema IEEE utilizado es presentado en [12], cuenta con los elementos necesarios para el análisis de propagación. En la Figura 29 se muestra el diagrama topológico del sistema y el esquemático realizado en ATPDraw.

Figura 29. Sistema de distribución IEEE a) Circuito topológico b) Esquemático en ATP





b)

A continuación se hace una breve descripción de este sistema.

El sistema de distribución consta de 34 nodos, localizado en Arizona con una tensión nominal de 24.9 kV a frecuencia de 60 Hz. Se caracteriza por ser de gran longitud, ligeramente cargado y por tener cargas desequilibradas. Al sistema fue necesario realizar las siguientes modificaciones:

- Inserción de un motor de inducción y su respectivo transformador: Se eliminó el ramal comprendido entre los nodos 832-890 y se agregó un motor en el nodo 890, ya que este sistema IEEE no cuenta con ningún motor de inducción.

Entre el nodo 832-888 se colocó un transformador para alimentar al motor a su tensión nominal. Las características del transformador se muestran en la Tabla 4 y las del motor en la Tabla 5. El motor se seleccionó de [7].

Tabla 4. Características transformador Nodos 832-888

	Primario	Secundario
Tensión [V]	21000	3940
Resistencia [Ω]	0.2894	0.026305
Inductancia [Ω]	26.672	2.4237
Conexión	Y	y
Grupo de conexión	Yy0	

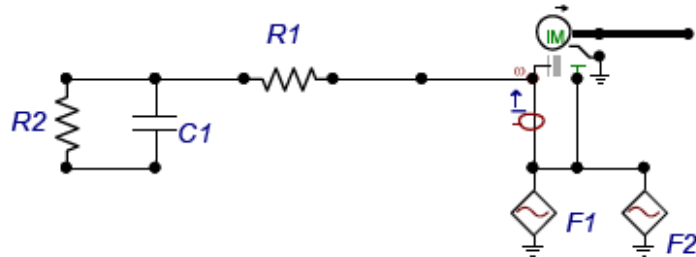


Tabla 5. Características motor de inducción

R_s [pu]	X_s [pu]	X_m [pu]	R_t [pu]	X_t [pu]	s [%]	H [sec]	S [KVA]	V[kV]
0.0163	0.0816	2.2500	0.0287	0.0836	2.2090	0.5	597	4.16

La máquina utilizada para la simulación del motor de inducción en ATP es *UM3_Induction*. En la Figura 30 se observa su modelo.

Figura 30. Modelo del motor en ATP



Las fuentes F1 y F2 se utilizan para especificar el torque mecánico impuesto por la carga al motor. $R1$ y $R2$ representan los coeficientes de fricción de la máquina y $C1$ especifica el momento de inercia.

- Inserción de transformador para pruebas de saturación: Se agregó un transformador entre los nodos 836-862 con las mismas características del transformador que estaba entre los nodos 832-888, pero con distinta curva característica para lograr el efecto de saturación del núcleo durante su energización. El ramal que se eliminó 832-890 paso a ser el ramal 836-838 (Se suprimió el ramal 836-838 del sistema original). Las características del transformador se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características transformador Nodos 832-888

	Primario	Secundario
Tensión [V]	24900	4160
Resistencia [Ω]	11.78	0.3288
Inductancia [Ω]	25.29	0.7060
Conexión	Δ	y
Grupo de conexión	$\Delta y1$	



La gráficas presentadas a continuación se encuentran en p.u con respecto a una tensión base de 20.4 kV (lado alta tensión), 3.4 kV (lado baja tensión), y 1500 kVA que es la potencia entregada por la fuente.

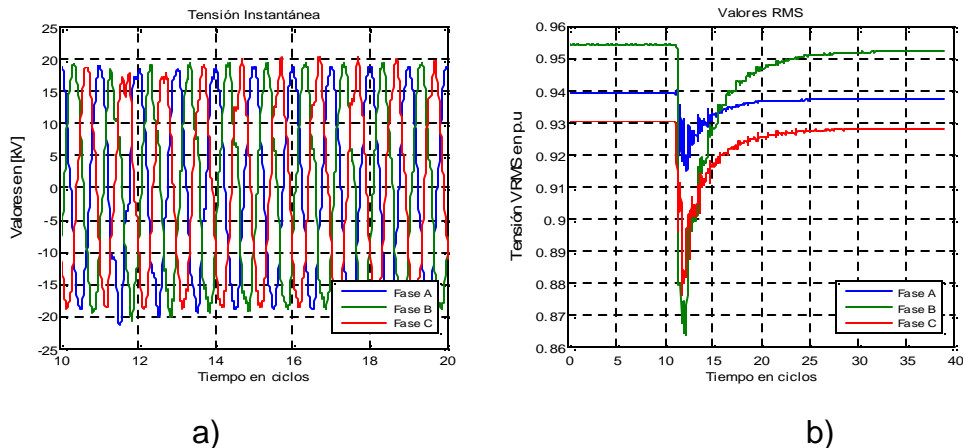
4.1 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS A ENERGIZACIÓN DE TRANSFORMADORES

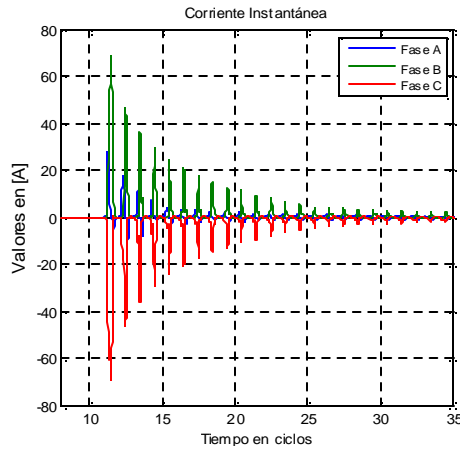
Para realizar esta prueba se energizó el transformador que está entre los nodos 836-862. Se realizaron dos casos de energización, el primero se energizó sin carga y el segundo se energizó con carga.

Los resultados que se obtuvieron en distintos nodos del sistema al energizar el transformador sin carga se muestran a continuación.

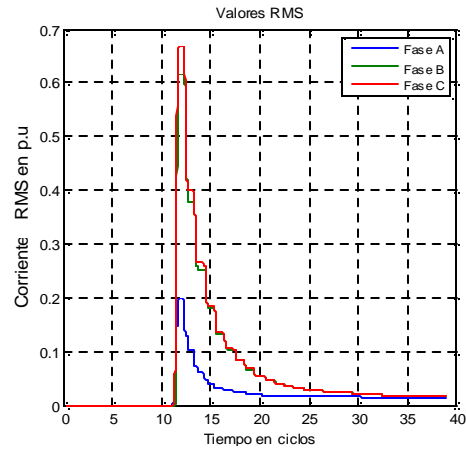
En la Figura 31 la corriente fluye del nodo 836 al lado de alta del transformador. En el momento de la energización la corriente pasa de 0 a 63 amperios (Figura 31c), esto es debido al sobreflujo que se produce en el núcleo del transformador. La corriente en estado estable del transformador es de 1.3 A pico, la cual corresponde a la corriente por la rama de magnetización ya que el transformador se encuentra en vacío. El grado de asimetría entre los ciclos positivos y negativos de la corriente instantánea (Figura 31c) indican la presencia de armónicos pares en la corriente del transformador durante la energización.

Figura 31. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$





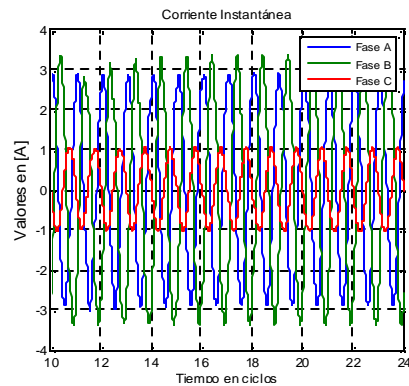
c)



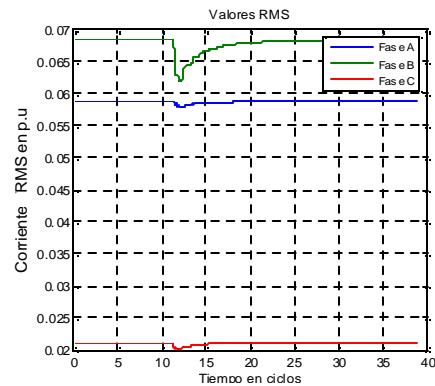
d)

Durante el hueco de tensión se pueden observar dos comportamientos de la magnitud de la corriente en el sistema. Uno en donde se incrementa y el otro donde disminuye (Figura 32). En la Figura 32c y Figura 32d la corriente aumenta debido a que el tramo 834-860 se encuentra aguas arriba del nodo 836. El flujo de corriente que circula desde la fuente hacia el nodo de energización aumenta, provocando caídas de tensión a lo largo del circuito. Consecuentemente, en los ramales aguas abajo del nodo 836 la corriente disminuye Figura 32a y Figura 32b. Se observa también que aguas abajo del nodo 836, es decir, nodo 836-860, el factor de potencia se mantiene y aguas arriba del nodo 836, es decir, nodos 834-840 se disminuye, Figura 32e y Figura 32f.

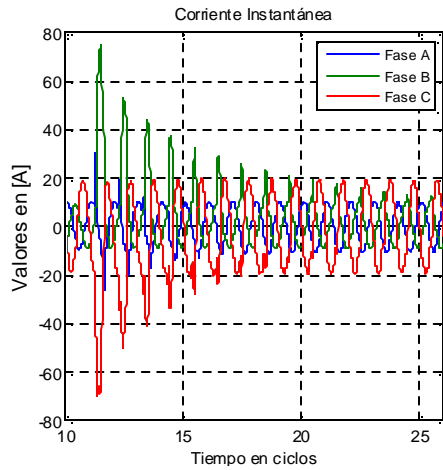
Figura 32. Comparación de valores de corriente a) $i(t)$ Nodos 836-840 b) $i_{rms}(t)$ Nodos 836-840 c) $i(t)$ Nodos 834-860 d) $i_{rms}(t)$ Nodos 834-860 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$ nodos 836-840 f) $\theta v(t)-\theta i(t)$ nodos 834-860.



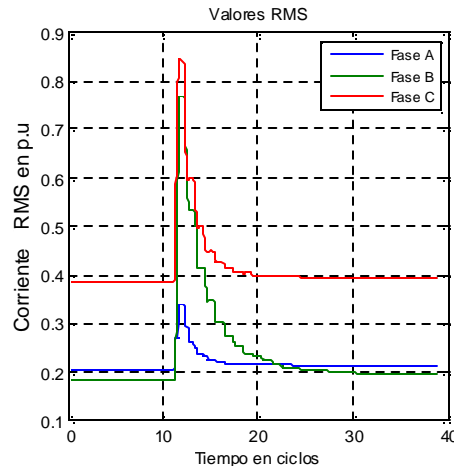
a)



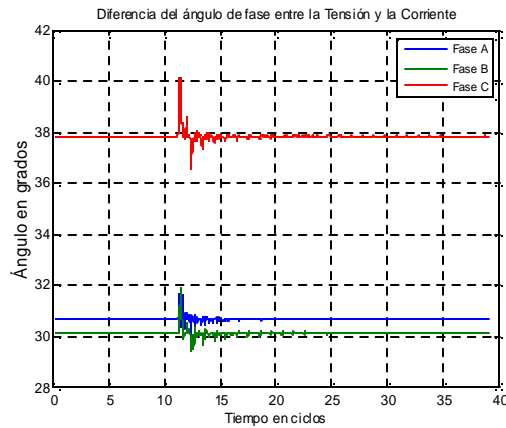
b)



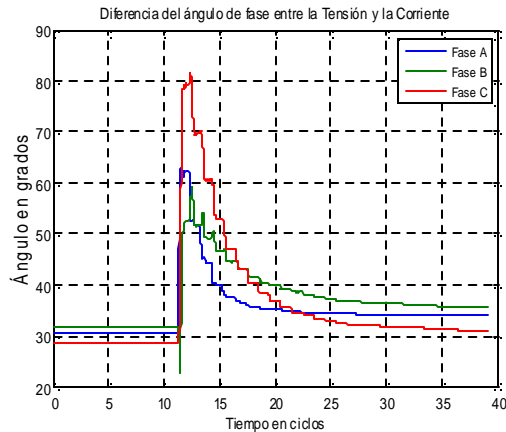
c)



d)



e)



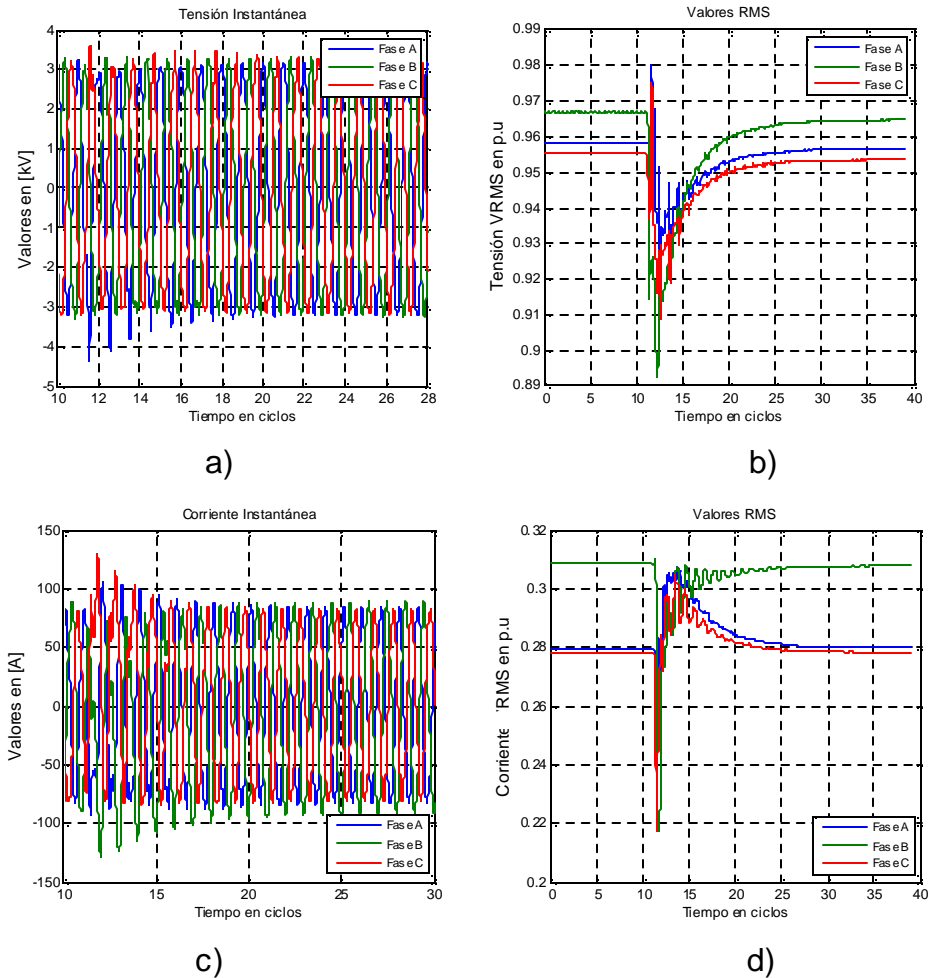
f)

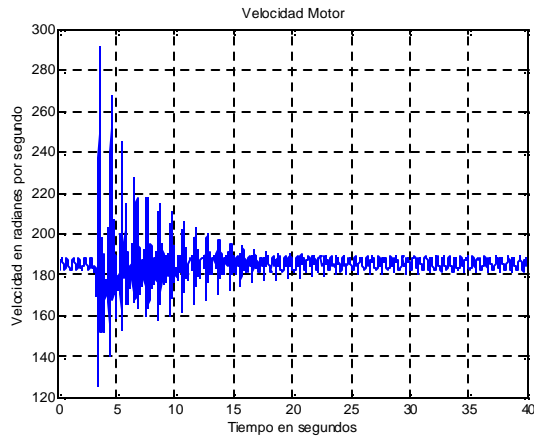
Observando las formas de onda registradas en el nodo 890 es posible analizar el comportamiento del motor ante la energización de un transformador, Figura 33. Cuando existe una caída o hueco de tensión en sus terminales, el motor reacciona aumentando la corriente intentado mantener su velocidad debida a la reducción de la tensión en sus terminales. Debido a que durante la energización de un transformador la forma de onda de tensión sufre una reducción instantánea de su amplitud, y luego una recuperación que dura unos ciclos, el motor a medida que recupera la magnitud de la tensión, su corriente se incrementa rápidamente (Figura 33d) intentando superar su corriente de pre-falla, luego se reduce hasta alcanzar su corriente y velocidad (Figura 33e) de operación. La reducción



instantánea del valor eficaz de la corriente indica que el evento de tensión es aguas arriba con respecto al punto de conexión del motor de inducción (Figura 33d).

Figura 33. Nodo 890. Terminales del motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) Velocidad del motor

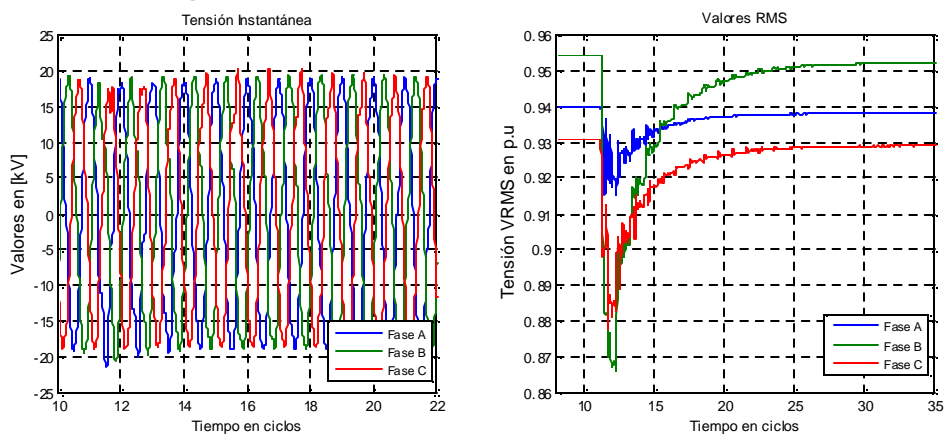




e)

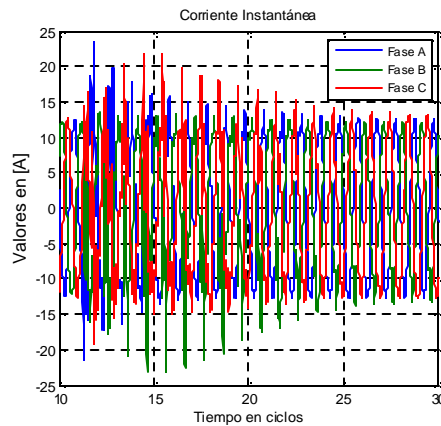
Los transitorios en la forma de onda de corriente que fluye en ramal 834-848 son debidos al cambio instantáneo de la tensión en los terminales de los bancos de condensadores en los nodos 844 y 848 lo cual provoca un cortocircuito instantáneo y corrientes transitorias de la forma obtenida Figura 34. En el momento de producirse la energización del transformador la corriente se incrementa instantáneamente debido al cambio repentino de tensión en los terminales del banco de condensadores , luego disminuye, por encontrarse aguas abajo del transformador energizado Figura 34c, Figura 34d.

Figura 34. Nodo 848. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$

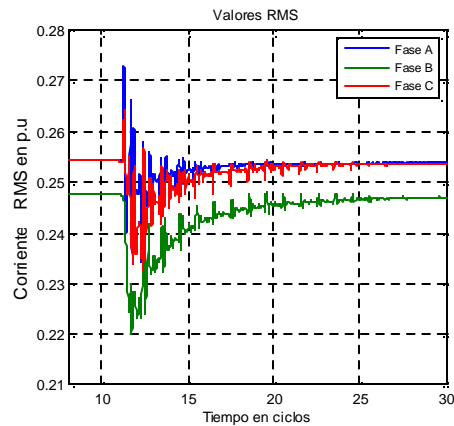


a)

b)



c)



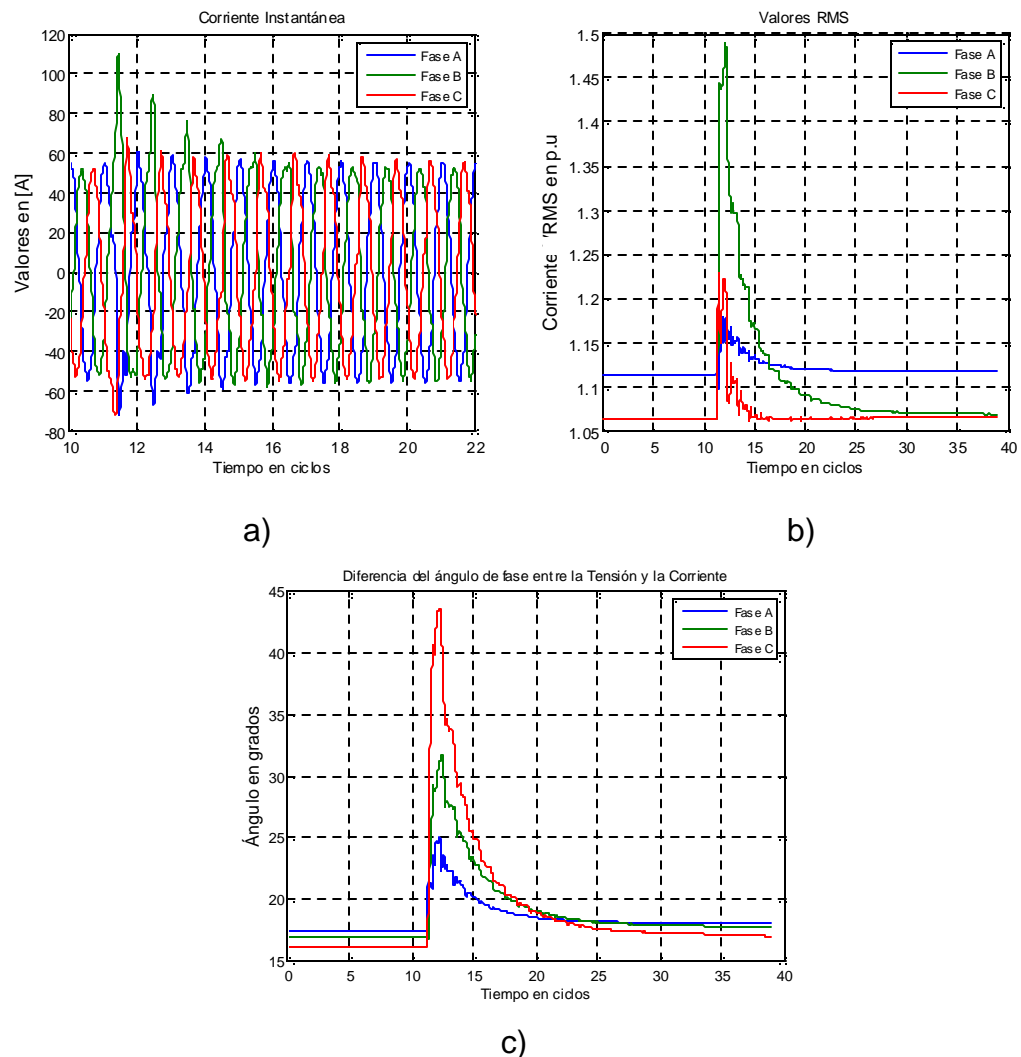
d)

El hueco de tensión en la energización del transformador tiene una magnitud alrededor del 88% en el nodo 836 y su duración es aproximadamente 13 ciclos Figura 31b. En cuanto a la propagación del hueco este sigue una forma de onda similar a la registrada en el nodo 836, pero a medida que se acerca a la subestación su profundidad disminuye debido a la impedancia de las líneas, el hueco en la cabecera de la subestación (Nodo 800) es de 97% y duración de 10 ciclos, este valor de magnitud no se considera hueco de tensión, sin embargo en la corriente todavía hay un valor significativo. El factor de potencia disminuye de 0.95 a 0.94 en la fase A de 0.95 a 0.93 en la fase C y de 0.96 a 0.93 en la fase C en atraso,

Figura 35. El desfase entre la tensión y corriente en cada fase depende directamente de la carga, en este caso, aunque los transformadores tienen un nivel de desbalance bajo entre cada uno de sus devanados, puede ser considerado como una carga trifásica y por ende los desfases entre las tres tensiones y corrientes son similares.



Figura 35. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $i(t)$ b) $i_{rms}(t)$ c) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



La diferencia al energizar el transformador con carga de sin carga está en la magnitud del hueco de tensión ya que este presenta una mayor profundidad debido a la energización de la carga como muestran la Figura 36 y Figura 37.

Se observa una magnitud del hueco de tensión de aproximadamente de 85%

Figura 36b. La corriente en estado estable del transformador es de 5 amperios picos, la cual corresponde a la corriente demandada por la carga Figura 36c.



En cuanto a la propagación del evento este sigue una forma de onda similar a la registrada en el nodo 836, pero a medida que se acerca a la subestación su profundidad disminuye, siendo está del 95% y duración de 10 ciclos, medidos en la cabecera de la subestación (nodo 800).

Figura 36. Nodo 836 lado de alta del transformado al energizarlo con carga. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$.

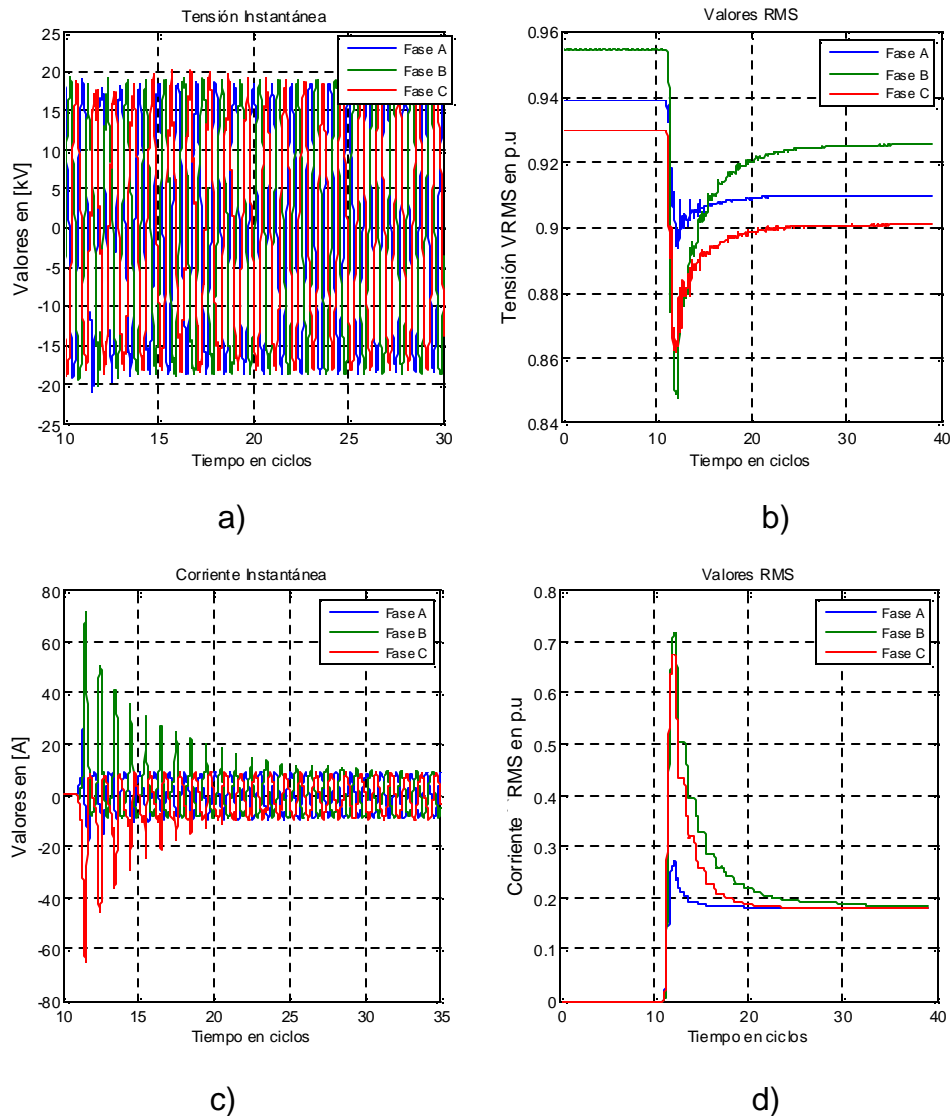
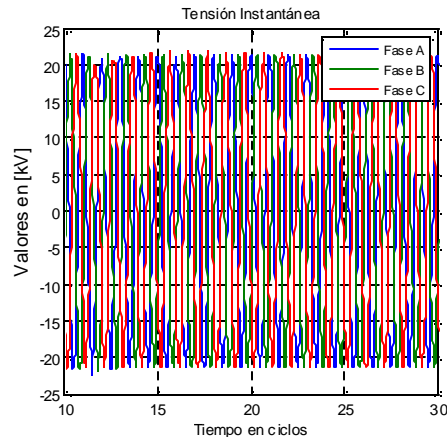
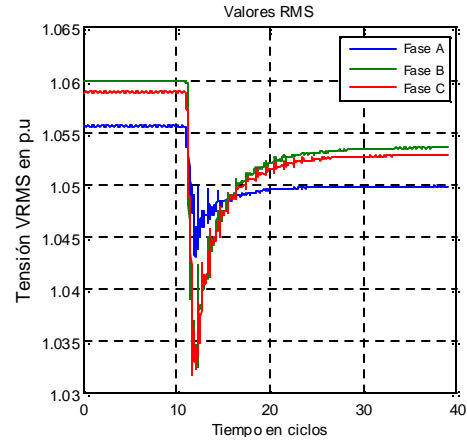




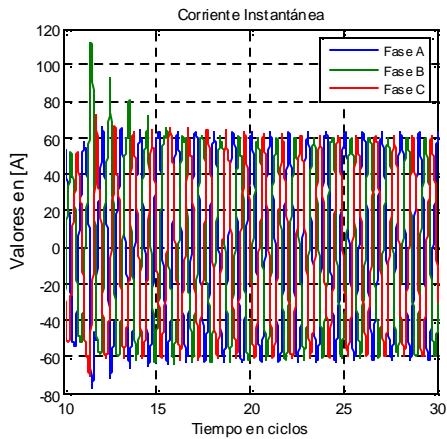
Figura 37. Nodo 800 cabecera de la subestación al energizar el transformador con carga. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



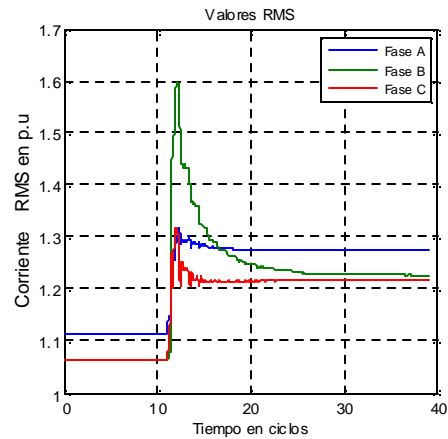
a)



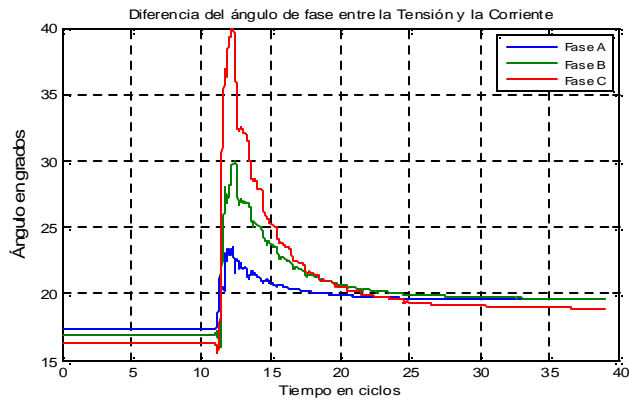
b)



c)



d)



e)



El hueco de tensión se registra en la subestación principal con forma de onda similar a la de su origen y con un valor mayor al 90%, por tanto ya no se considera como hueco de tensión en este punto del sistema. Sin embargo el valor de la corriente aumenta de su valor nominal a un valor considerable y luego cae a un nuevo estado estable debido al consumo de corriente por parte del transformador y de la carga. La disminución del factor de potencia en comparación con la energización del transformador sin carga no es alta, lo que indica que la carga no es altamente inductiva y no es muy significativa.

4.2 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS AL ARRANQUE DE MOTORES

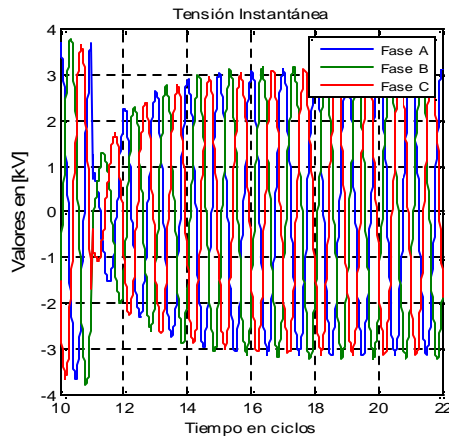
En este capítulo se analiza la propagación de las ondas de tensión y corriente por el sistema de distribución debidas al arranque del motor en el nodo 890.

Se realizaron 2 casos en que se arranca el motor, el primero suponiendo el motor trabajando al 75% y el otro al 50% de su carga nominal.

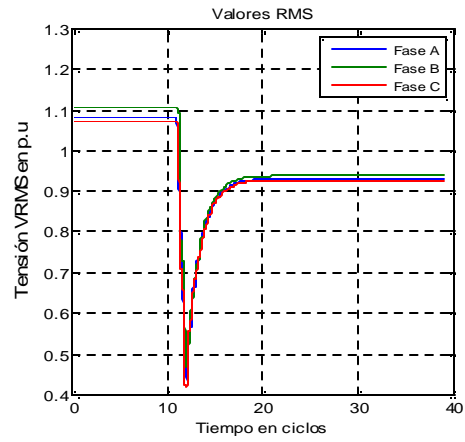
Al energizar el motor (nodo 890) con una carga igual al 75% de la nominal, la corriente de arranque alcanza valores de 4 veces su valor nominal Figura 38c y Figura 38d, esta alta corriente de arranque causa un hueco de tensión de 40% de magnitud como muestra la Figura 38b. La forma de la onda de tensión es balanceada debido a que el motor es de naturaleza trifásica. Mientras el motor alcanza el valor de la velocidad nominal la corriente se mantiene por encima de su valor de estado estable. En la Figura 38e se ve que en el momento del arranque, el motor alcanza su velocidad de estado estable en un periodo igual a 5 ciclos. El valor negativo en la velocidad antes de la energización del motor indica que el motor se encuentra desenergizado.



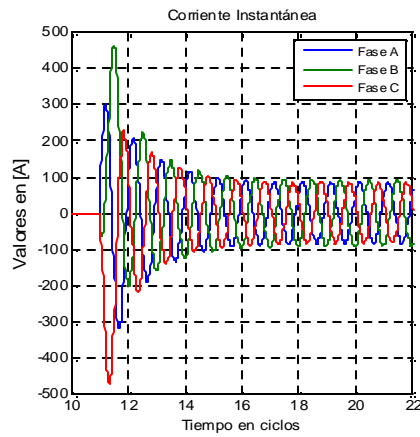
Figura 38. Nodo 890. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) Velocidad del motor.



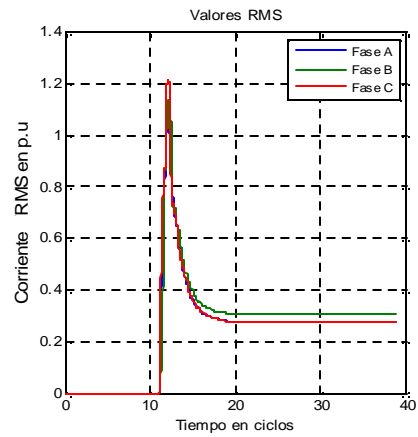
a)



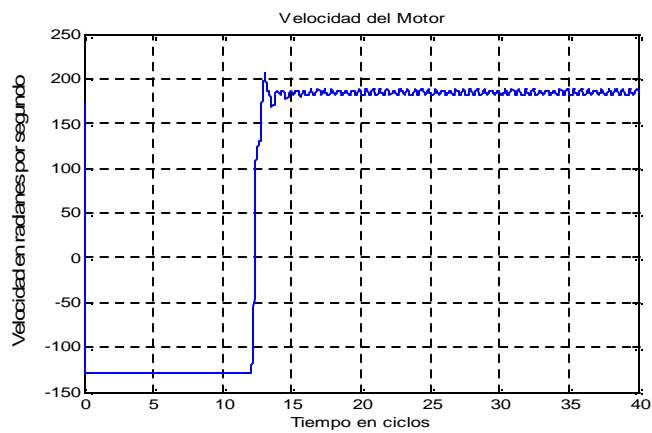
b)



c)



d)

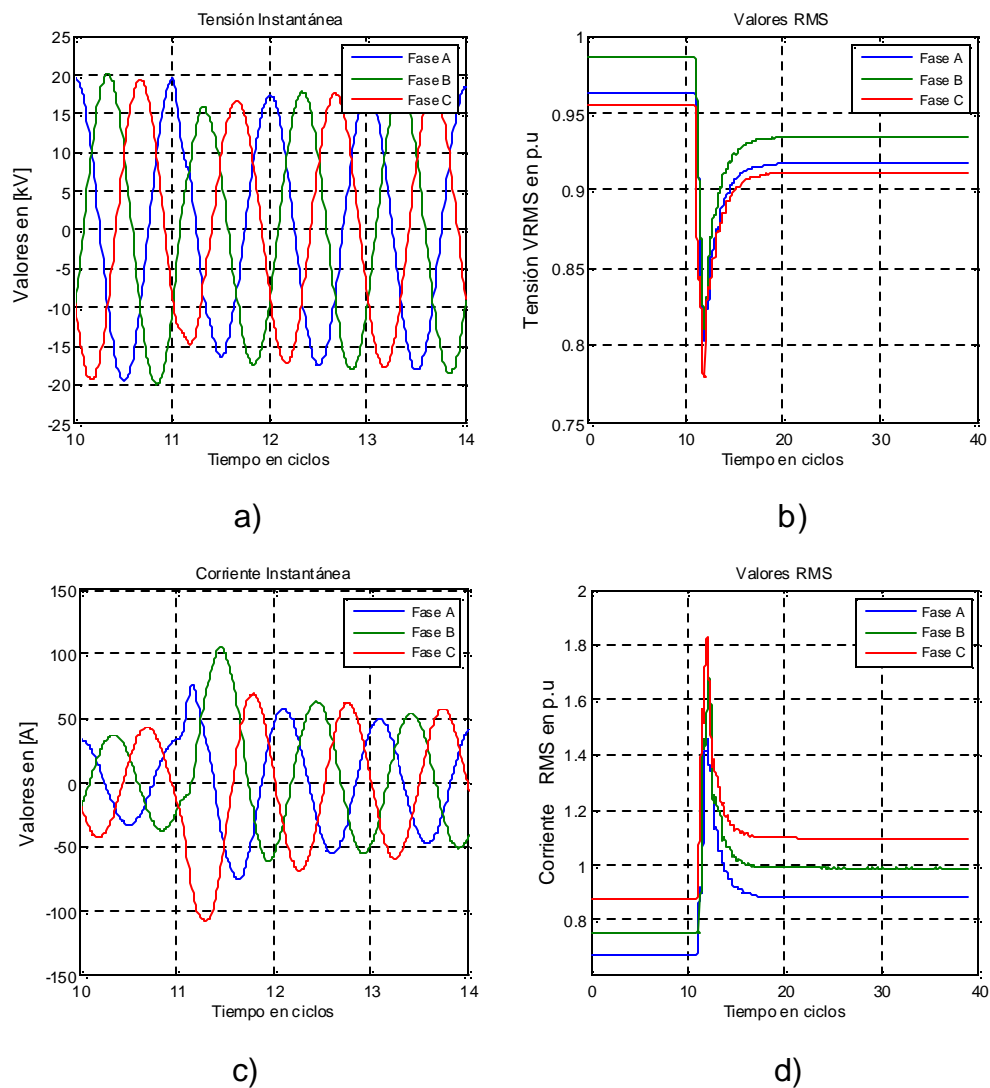


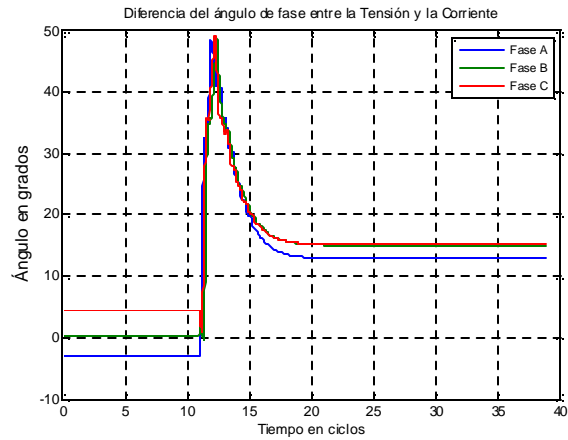
e)



Agua arriba del motor, la corriente aumenta Figura 39c y Figura 39d, circulan desde la fuente hacia el punto de la causa, provocando caídas de tensión a lo largo del circuito. El factor de potencia disminuye de 0.99 a 0.97 en la fase A, de 1 a 0.96 en la fase B y de 0.99 a 0.9627 en la fase C Figura 39e. Lo contrario sucede agua abajo del motor, la corriente disminuye pero el factor de potencia se mantiene aproximadamente en 0.99 en las fases A, B y C Figura 40.

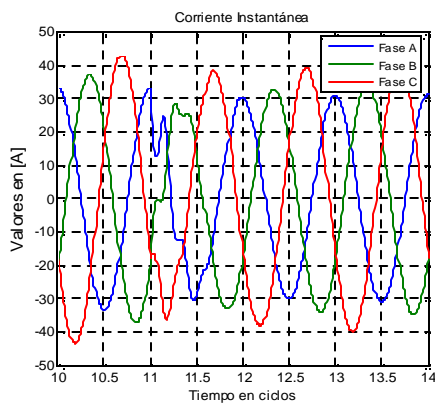
Figura 39. a) $v(t)$ Nodo 832 b) $v_{rms}(t)$ Nodo 832 c) $i(t)$ que fluye por el tramo 854-832 d) $i_{rms}(t)$ en el tramo 854-832 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



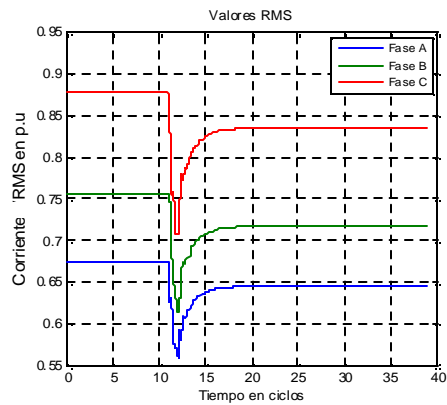


e)

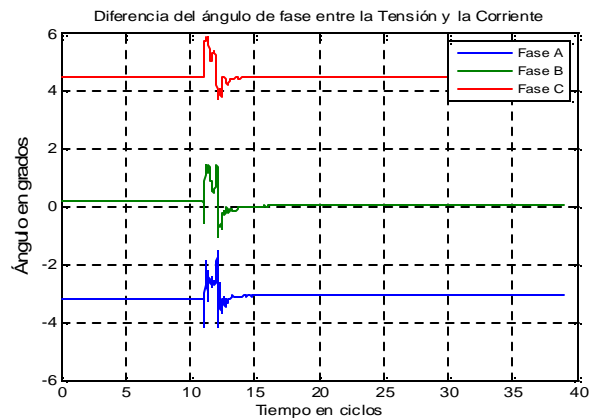
Figura 40. a) $i(t)$ que fluye por el tramo 832-858 b) $i_{rms}(t)$ en el tramo 832-858 c) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



a)



b)

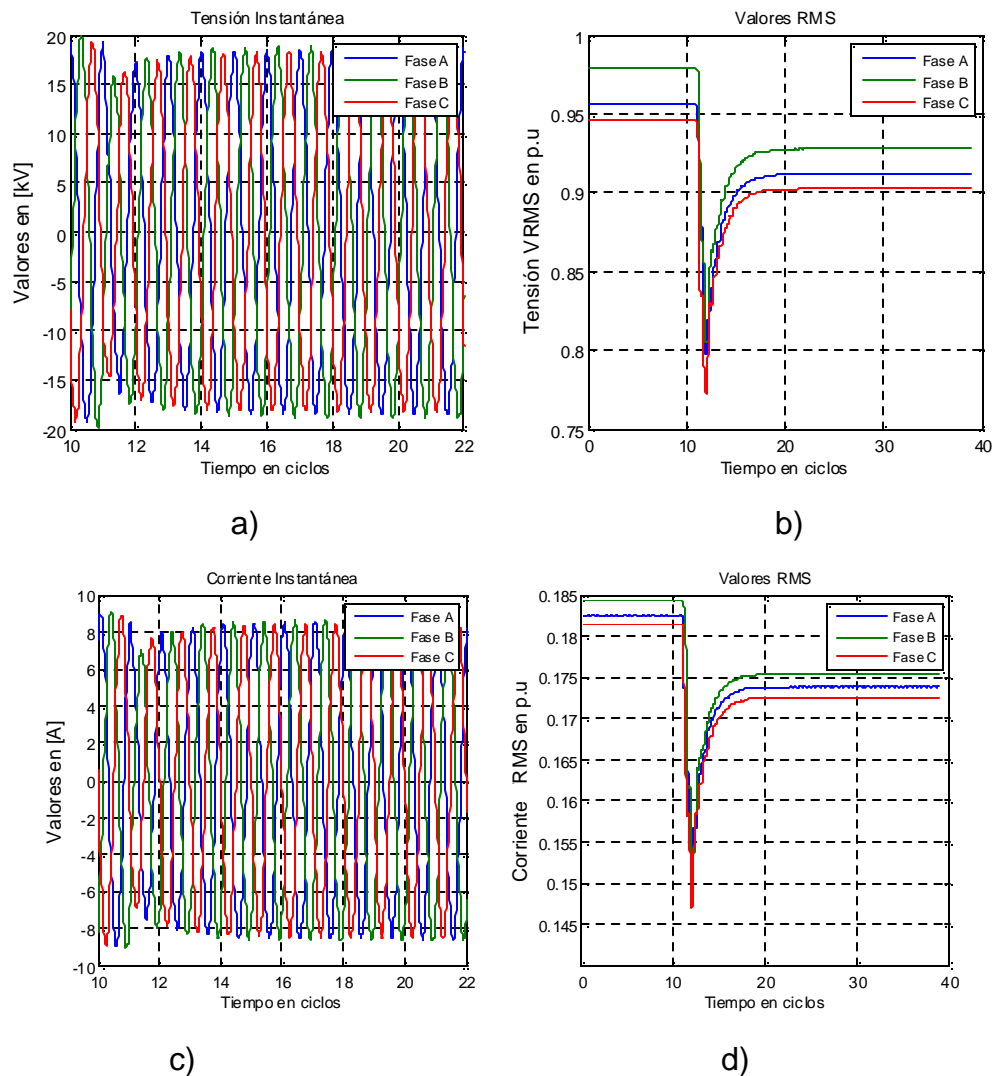


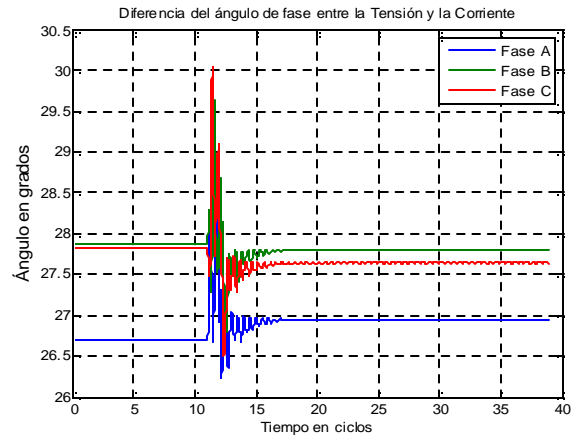
c)



En el nodo 836 se presenta un hueco de tensión de magnitud igual a 82% y de igual forma al hueco en el nodo de origen (890), con respecto a la corriente, esta presenta una disminución ya que es aguas abajo del motor y por lo tanto el factor de potencia se mantiene como se mencionó anteriormente ($FP=0.88$) Figura 41. Al pasar este hueco por el transformador sigue manteniendo su forma pero desfasada las tensiones 30 grados, ya que este es un transformador Dy1, el factor de potencia se sigue manteniendo (0.88), Figura 42.

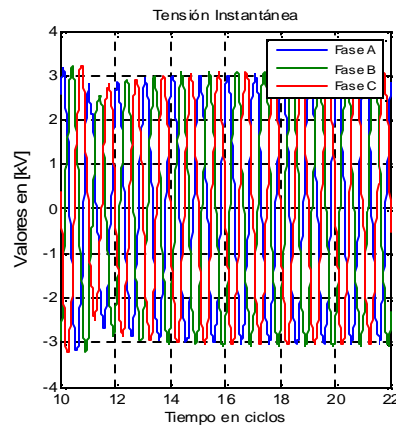
Figura 41. a) $v(t)$ en el nodo 836 b) $v_{rms}(t)$ nodo 832 c) $i(t)$ que fluye del nodo 836 al lado de alta del transformador d) $i_{rms}(t)$ que fluye del nodo 836 al lado de alta del transformador e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



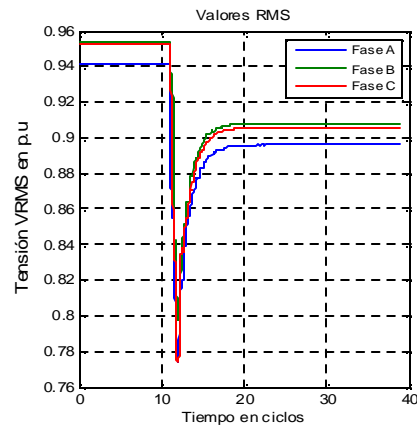


e)

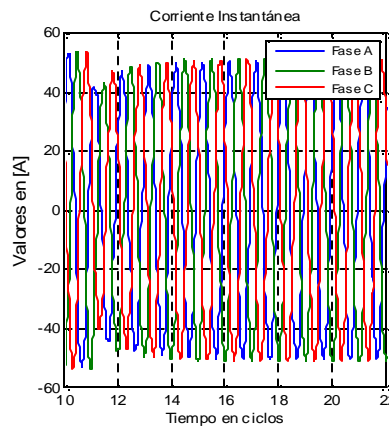
Figura 42. a) $v(t)$ en el nodo 862 b) $v_{rms}(t)$ nodo 862 c) $i(t)$ que fluye por el tramo 862-838 d) $i_{rms}(t)$ en el tramo 862-838 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



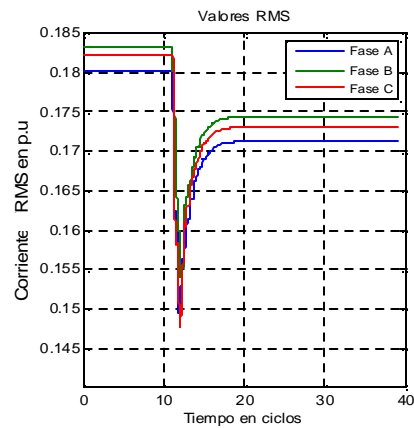
a)



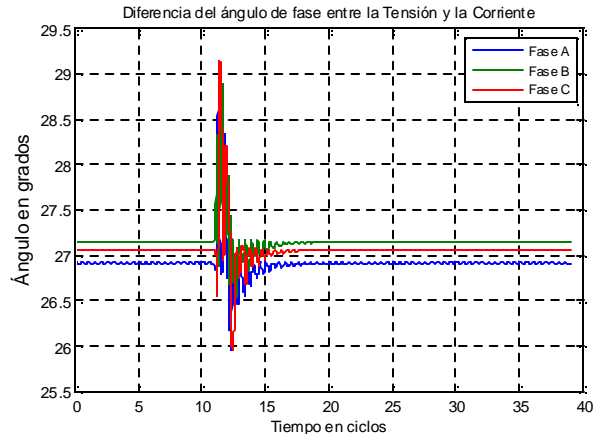
b)



c)



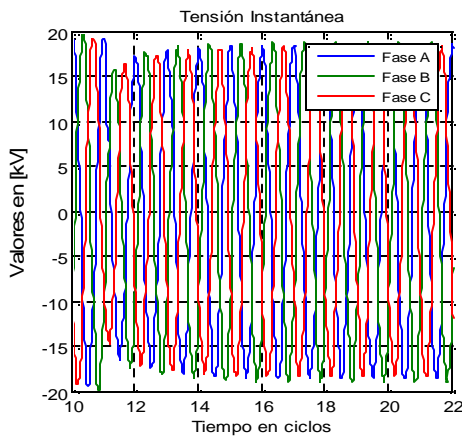
d)



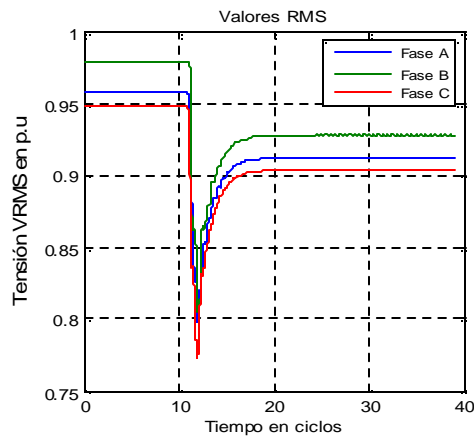
e)

La corriente que entra en el banco de condensadores en el nodo 848 Figura 43c y las corrientes que fluyen por el tramo 844-848, en el momento del arranque (11 ciclos) presentan un pico de corriente que es debido a los bancos de condensadores en los nodos 844 y 848 que no permiten un cambio brusco de tensión en sus terminales, luego del pico de corriente esta cae como se mencionó que sucedía en los ramales aguas abajo del motor y se recupera hasta alcanzar su estado estable. El factor de potencia no cambia ya que este es un ramal aguas abajo.

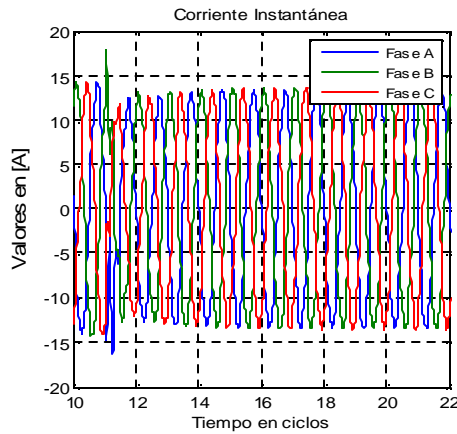
Figura 43. a) $v(t)$ en el nodo 848 b) $v_{rms}(t)$ nodo 848 c) $i(t)$ que fluye hacia el banco de condensadores en el nodo 848 d) $i_{rms}(t)$ que fluye hacia el banco de condensadores en el nodo 848 e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



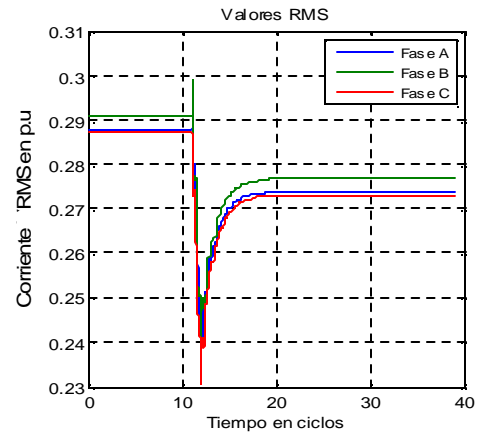
a)



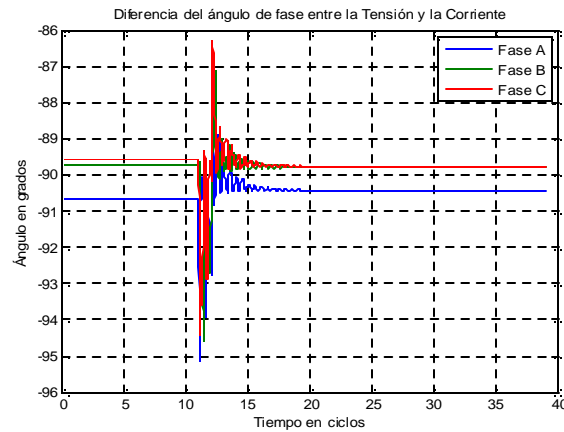
b)



c)



d)



e)

El hueco de tensión llega a la subestación principal con la misma forma de onda de origen con una magnitud de 95%, por tanto ya no se considera como hueco de tensión. Sin embargo el valor de la corriente aumenta aproximadamente al doble de su valor nominal y luego cae a un nuevo estado estable igual 60 Arms mayor al anterior 35Arms debido a la nueva carga (motor). El factor de potencia en la fuente cambia de 0.98 a 0.94 en atraso.

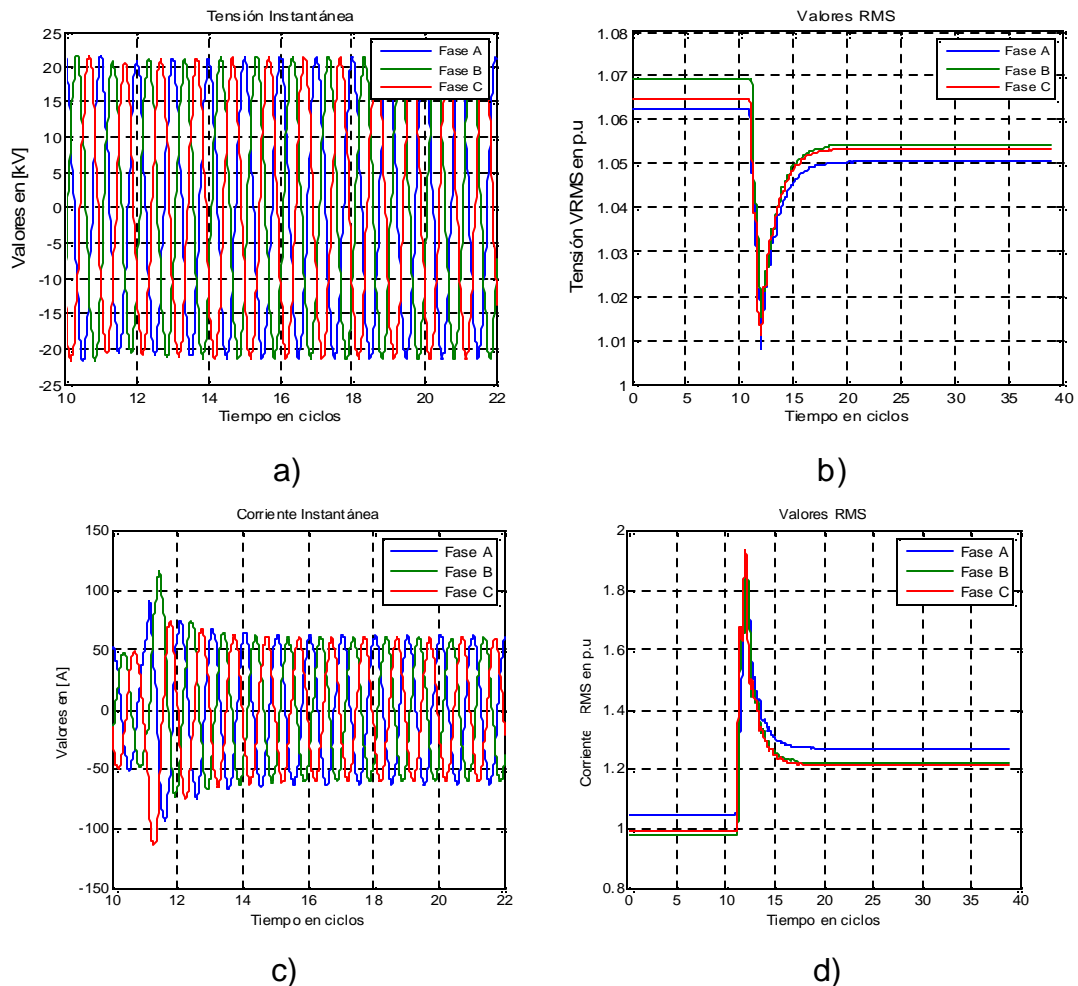
Se puede observar que el hueco de tensión se propaga por todo el sistema manteniendo su forma pero variando su magnitud, en la propagación aguas arriba del motor la tensión se recupera de manera más rápida que cuando se propaga aguas abajo. La corriente al propagarse por el sistema presenta dos condiciones.

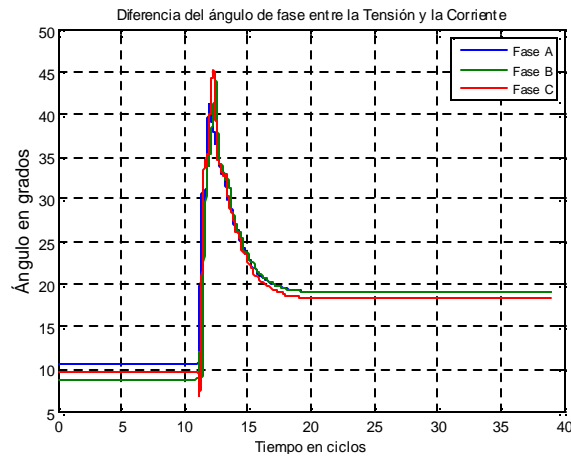


La primera ocurre aguas arriba del motor, esta presenta una sobrecorriente y luego cae a un estado estable de mayor magnitud a su valor antes de energizar el motor (Este aumento en el valor de la corriente se debe a la nueva carga, el motor). Lo contrario sucede cuando se observa la corriente aguas abajo del motor, esta presenta una disminución y el valor en estado estable es menor al valor que tenía antes de energizar el motor.

Con respecto al factor de potencia este no presenta variación aguas abajo del motor pero aguas arriba el factor de potencia se ve afectado debido al consumo de reactivos del motor, por tanto este valor disminuye.

Figura 44. a) $v(t)$ nodo 800 b) $v_{rms}(t)$ nodo 800 c) $i(t)$ que entrega la fuente d) $i_{rms}(t)$ que entrega la fuente e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.





e)

La diferencia al energizar el motor al 50% del 75% de la potencia nominal está en la magnitud del hueco de tensión ya que este presenta una menor caída debido a que la carga disminuye Figura 45d y Figura 46d. Esta diferencia entre las tensiones de pos-hueco es leve, lo mismo ocurre en las tensiones que quedan después del evento.

En cuanto a las corrientes la diferencia está en que el pico de corriente que se presenta en el momento de la energización del motor es un poco menor, lo mismo ocurre con la magnitud de la corriente después de presentarse el evento debido a que la carga que mueve el motor es menor. Figura 45b y Figura 46b. En cuanto a la propagación del evento este sigue una forma de onda similar a la registrada en el nodo 890, pero a medida que se acerca a la subestación su profundidad disminuye, siendo está del 5.6% y duración de 9 ciclos, medidos en la cabecera de la subestación (nodo 800).



Figura 45. Nodo 890 con el motor al 50%. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) Velocidad del motor

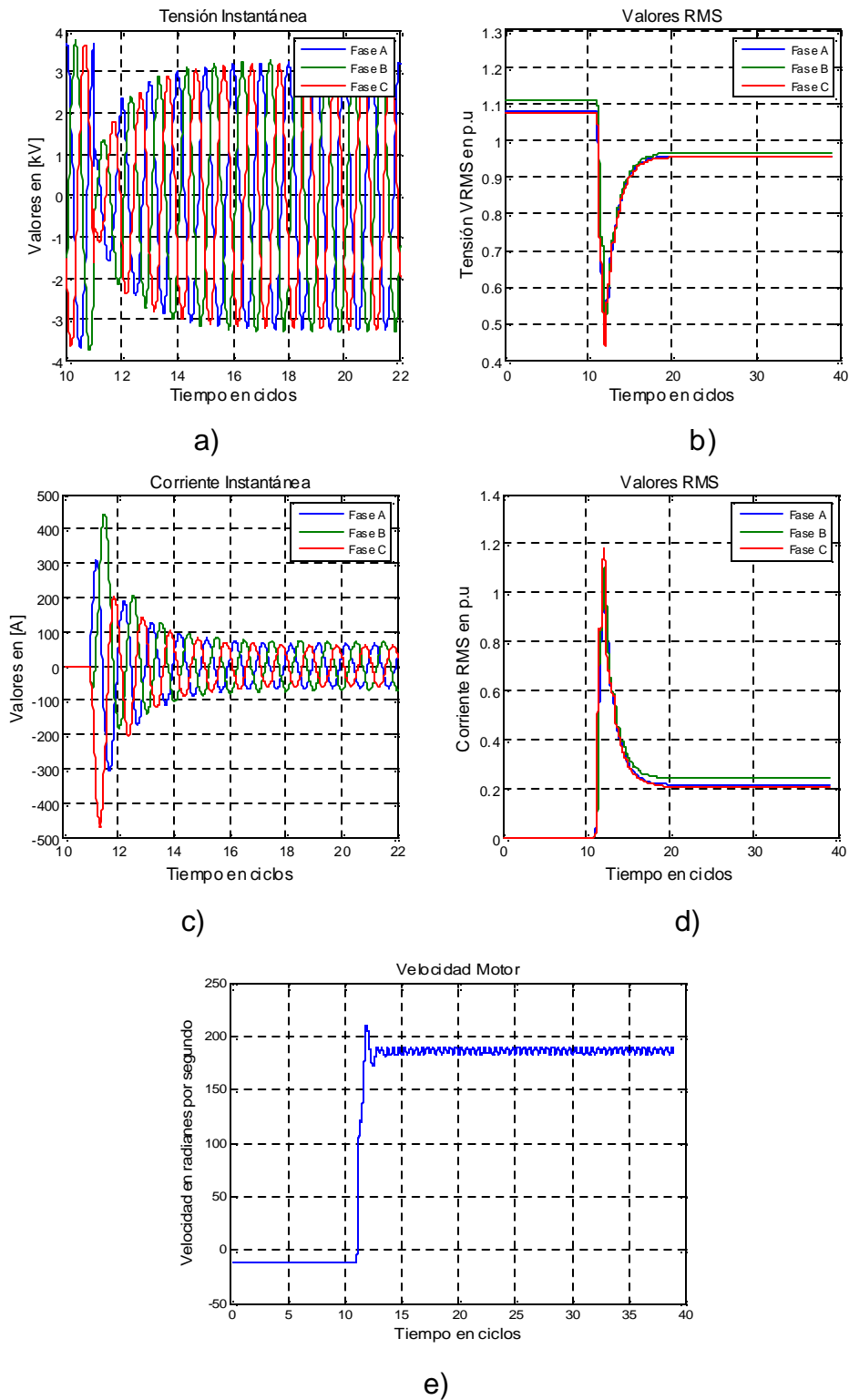
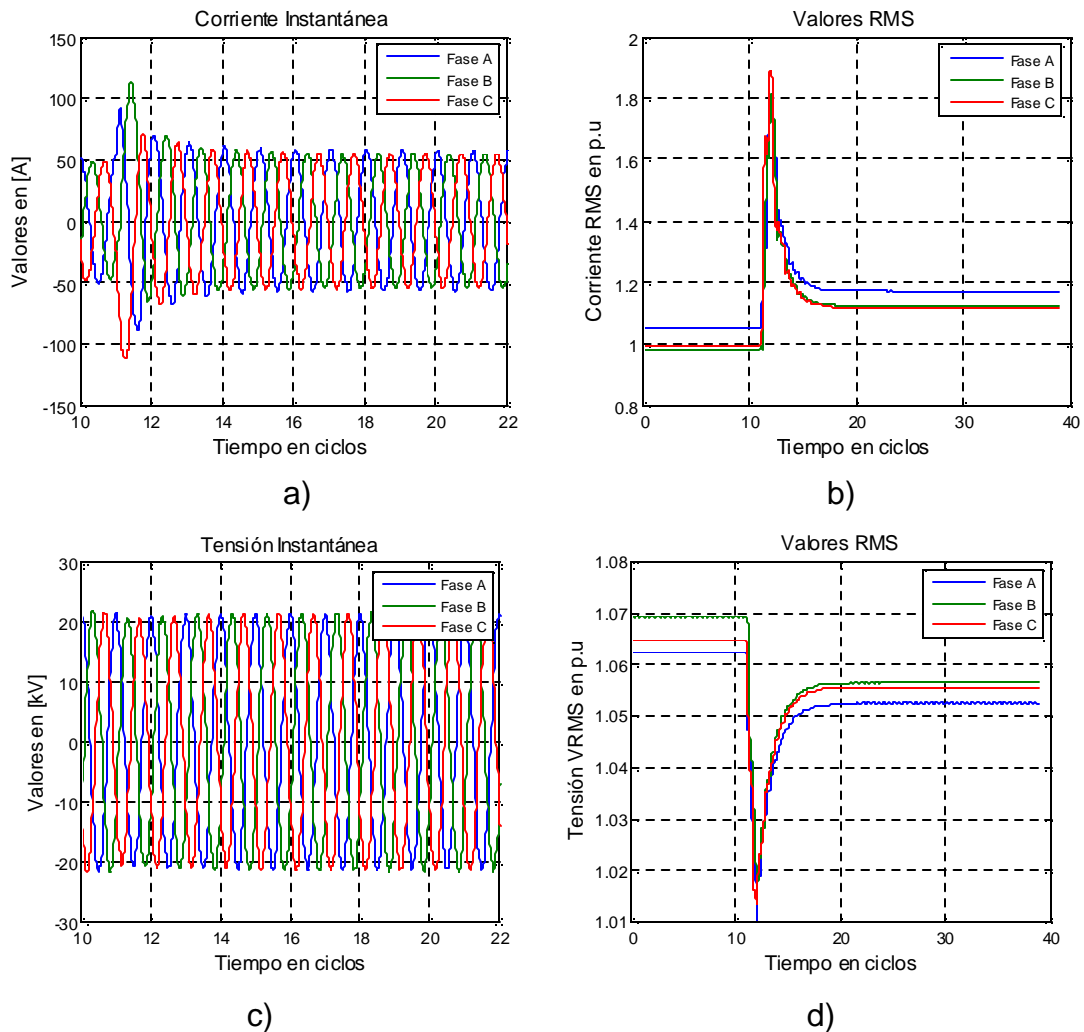




Figura 46. Nodo 800 con el motor al 50%. a) $i(t)$ b) $irms(t)$ c) $v(t)$ d) $vrms(t)$.



4.3 PROPAGACIÓN DE LA PERTURBACIÓN DEBIDA A LA ENERGIZACIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES

En este capítulo se analiza la propagación de las ondas de tensión y corriente a lo largo del sistema de distribución al energizar bancos de condensadores. Igualmente, se analiza la localización relativa (aguas arriba/abajo) del banco de condensadores con respecto al punto de medida, aplicando el concepto descrito en [13].



Tabla 7. Potencia reactiva de los bancos de condensadores instalados en el sistema.

Nodo	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150
Total	250	250	250

El sistema cuenta con dos bancos de condensadores ubicados en los nodos 844 y 848, la tabla 7 muestra la potencia reactiva de cada condensador. Para las pruebas de energización se tuvieron en la cuenta los siguientes 4 casos:

Caso 1: En esta prueba se energizó el banco de condensadores ubicado en el nodo 844 estando desenergizado el banco ubicado en el nodo 848.

Caso 2: Esta prueba es la misma que el caso anterior pero aumentando la potencia reactiva del banco en el nodo 844 a 200 kVAr, es decir se incrementó en 100 kVAr por fase.

Caso 3: Se energiza el banco de condensadores ubicado en el nodo 848 estando el banco de condensadores del nodo 844 energizado.

Caso 4: Se energizan ambos bancos al mismo instante.

Para todos los casos los bancos de condensadores fueron energizados en el instante correspondiente al ciclo número 11.

Los resultados que se obtienen para los diferentes casos se muestran a continuación:

4.3.1 Caso 1 y Caso 2: Energización de bancos de condensadores

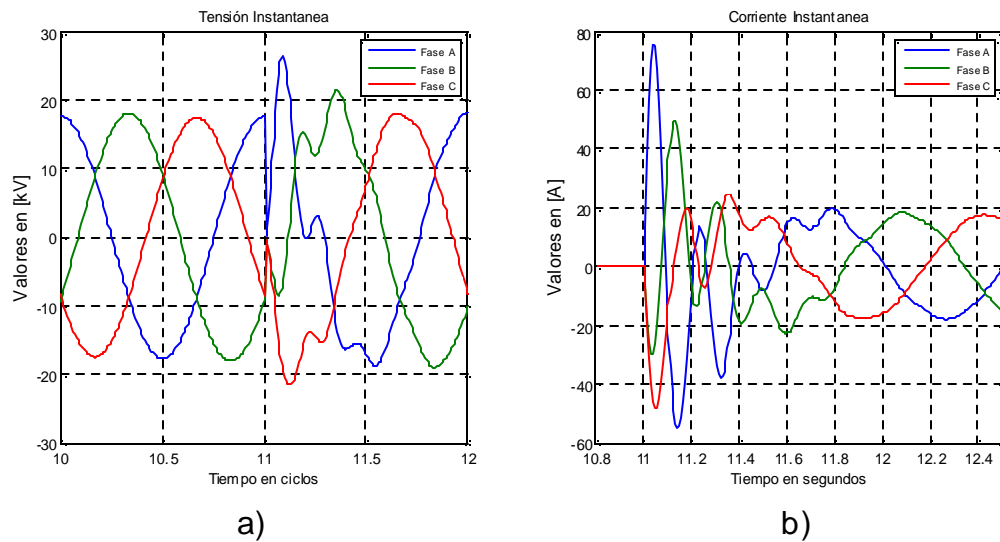
Debido a que los resultados obtenidos en el caso uno y dos sus formas de onda son similares, la diferencia está en los valores obtenidos, se utilizaron los resultados del caso dos debido a que sus efectos son más claros.



Como el banco de condensadores en el Nodo 844 esta descargado, al energizarlo este toma corrientes transitorias elevadas cuya magnitud máxima es de 75 amperios Figura 47b. En el momento de cerrar el circuito este se comporta como un elemento de corto circuito instantáneo ya que la tensión inicial en los terminales del capacitor es cero, como el capacitor está siendo cargado, la tensión instantánea se eleva y rebasa momentáneamente la tensión pico del sistema Figura 47a. En el transitorio de tensión Figura 47a se pueden observar que ocurren dos cruces por cero antes del cruce por cero natural de tensión. Por tanto equipos que utilizan los cruces de tensión por cero para el cronometraje o control son propensos a una mala operación.

En la práctica, los picos de corriente originados en la conexión de bancos de condensadores toman valores de 5 a 15 veces la corriente nominal del banco [14]. Las sobretensiones máximas observadas en el momento de la conexión son de alrededor de 1.8 veces la tensión pico, para bancos de condensadores descargados, y de 2.7 veces la tensión pico, al energizar bancos de condensadores cargados [14].

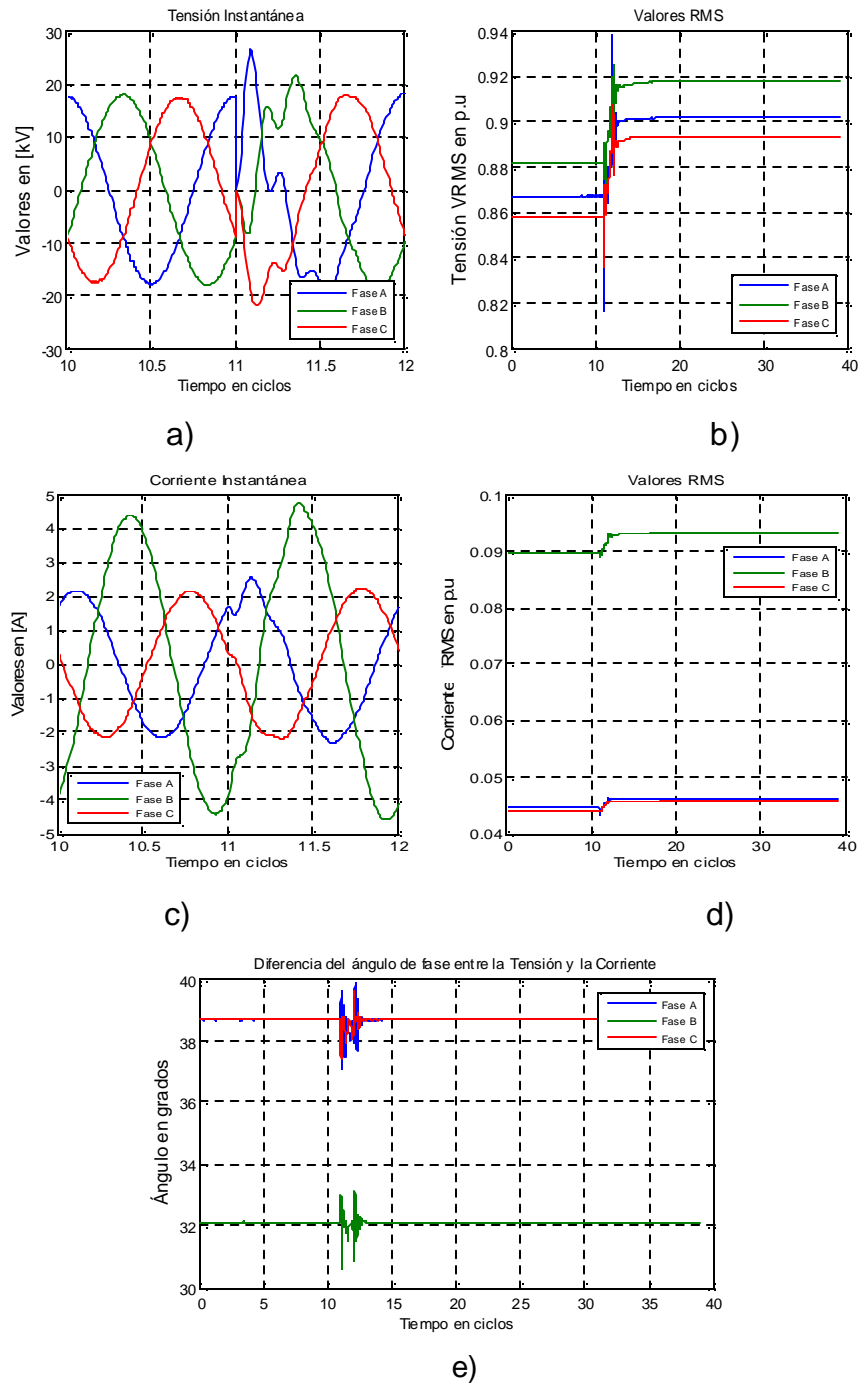
Figura 47. a) $v(t)$ nodo 844 b) $i(t)$ de entrada al banco conectado en el nodo 844.





De acuerdo a [13], el factor de potencia cambia solamente aguas arriba del banco de condensadores, y los signos dv/dt y di/dt son opuestos en las líneas aguas arriba y el mismo en las líneas aguas abajo del banco de condensadores.

Figura 48. Nodo 846 aguas abajo del banco de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

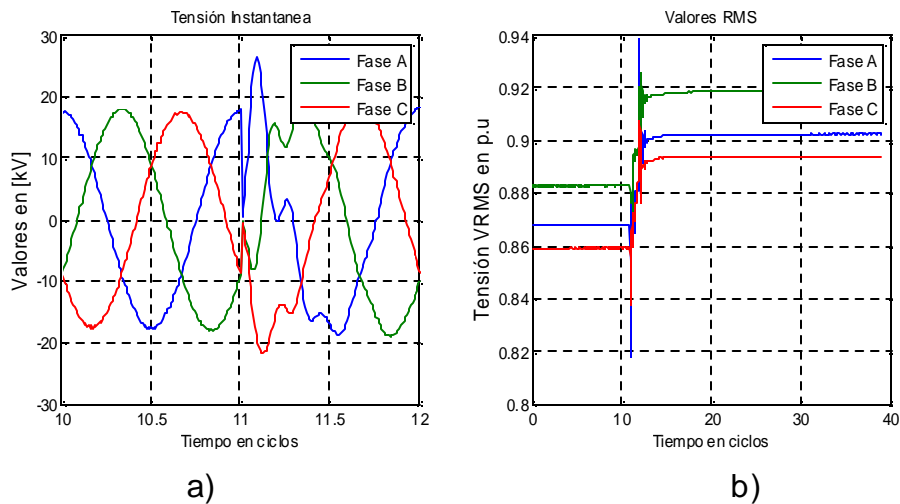


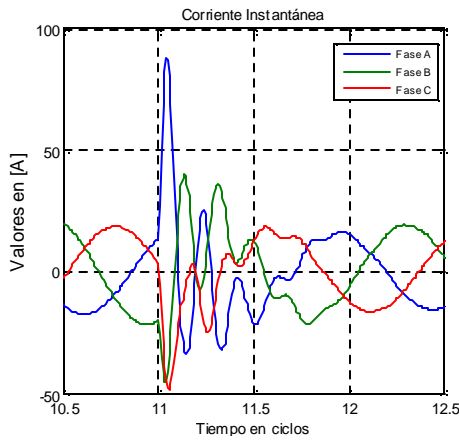


En la Figura 49e puede ser visto que el nodo 842 aguas arriba del banco evidencia una mejora del factor de potencia al presentarse la energización del banco en el nodo 844, 0.79 en atraso a 0.91 en adelanto en la fase A, 0.81 en atraso a 0.96 en adelanto en la fase B y de 0.79 en atraso a 0.93 en adelanto en la fase C. El nodo 846 no presenta variación del factor de potencia debido a que está aguas abajo del banco energizado, Figura 48e.

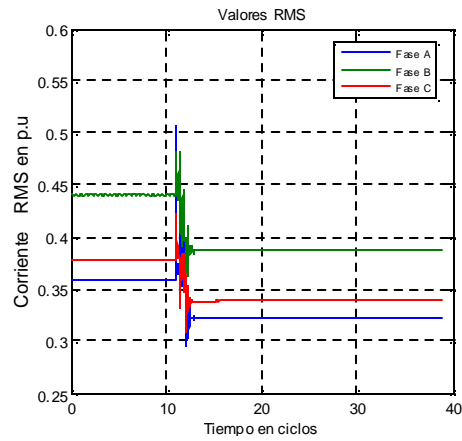
Igualmente, la polaridad de los gradientes de la tensión y corriente inmediatamente después de la conmutación instantánea confirman el concepto propuesto en [15]. Tal como se presenta en la Figura 48a y Figura 48c donde la tensión y la corriente se comportan en la misma dirección justo después de la conmutación de bancos de condensadores. Claramente podemos observar polaridades opuestas de la tensión y la corriente justo después del instante de la energización, Figura 49a y Figura 49c.

Figura 49. Nodo 842 aguas arriba del banco de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

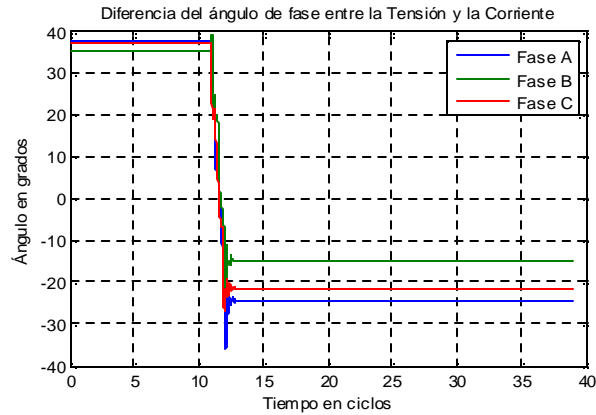




c)



d)



e)

Como se observa en las formas de onda correspondientes a los nodos 836 y 862 Figura 50 y Figura 51, existe un desfase de 30° entre ellas como consecuencia de la conexión Dy1 del transformador. El hecho de que no haya un cambio en las formas de onda entre el lado de alta y el lado de baja del transformador implica que la perturbación no tiene componente de secuencia cero.

No se presenta variación del factor de potencia en los nodos mencionados e igualmente en el nodo 890, Figura 52e, donde está conectado el motor debido a que el factor de potencia se mejora en el camino directo hacia la fuente (aguas arriba del capacitor).



Figura 50. Nodo 836 hacia el lado de alta del transformador, aguas abajo del banco. a) $v(t)$ b) $vrms(t)$ c) $i(t)$ d) $irms(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

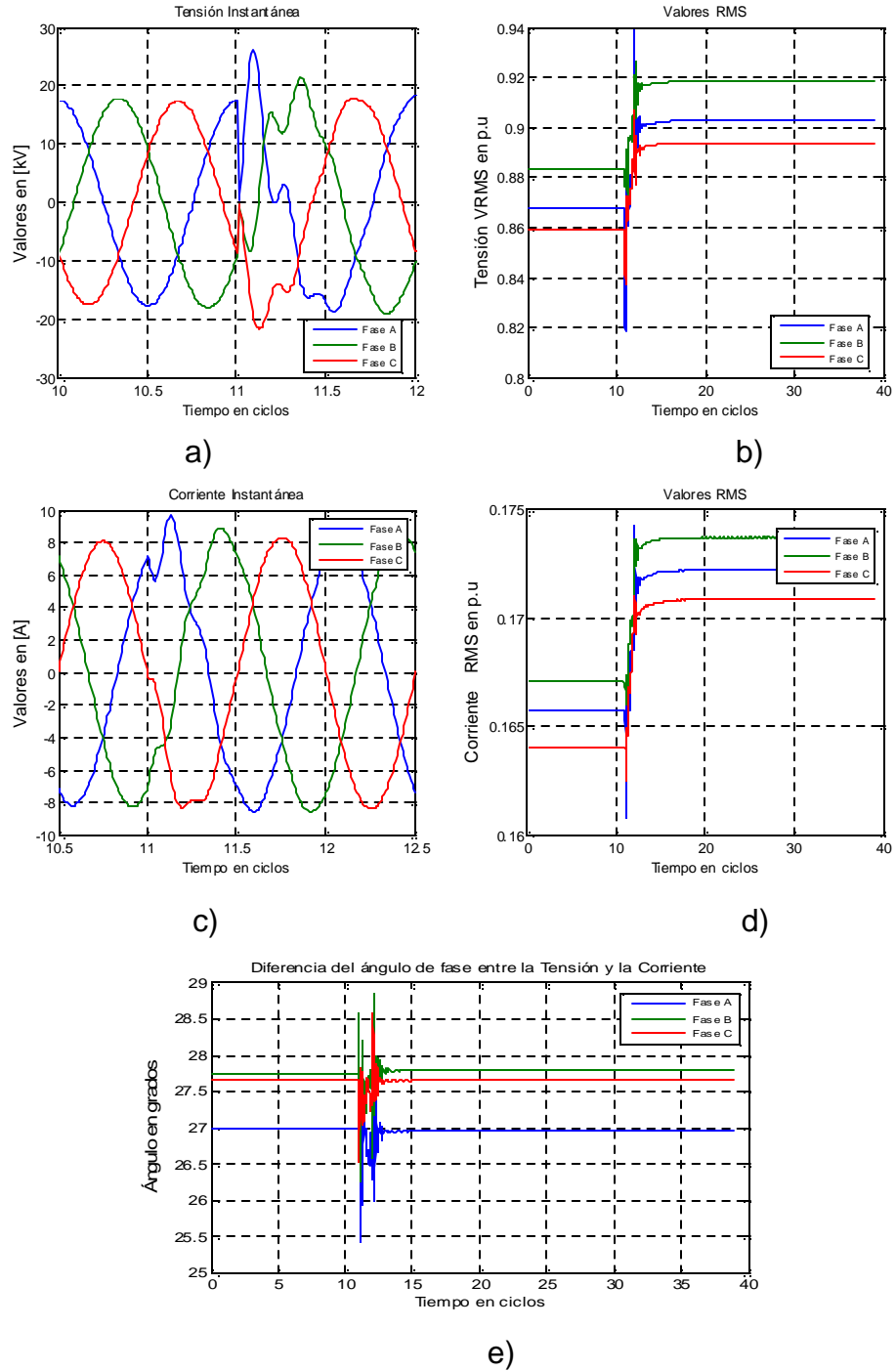




Figura 51. Nodo 862 lado de baja del transformador, aguas abajo del banco. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

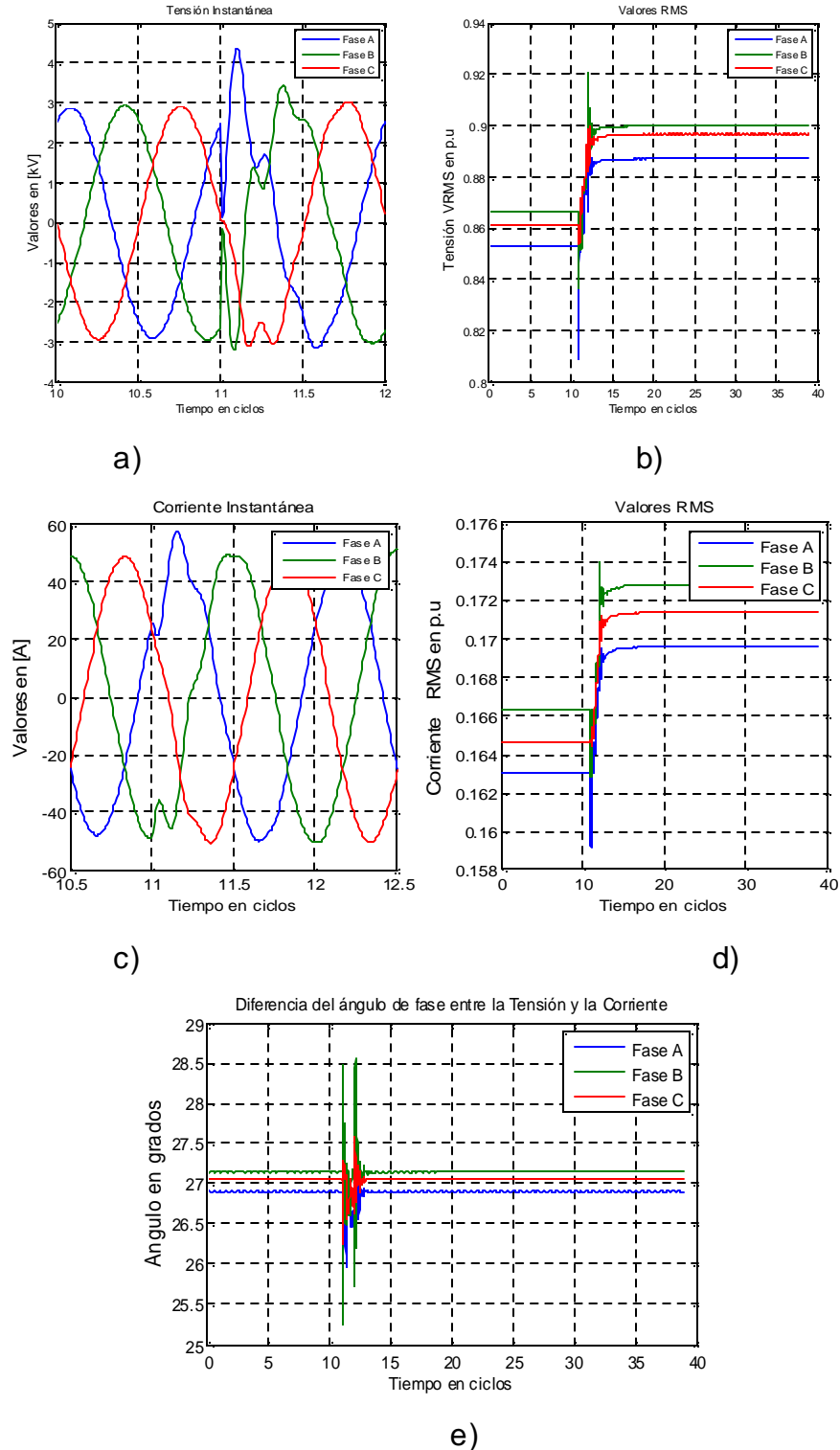
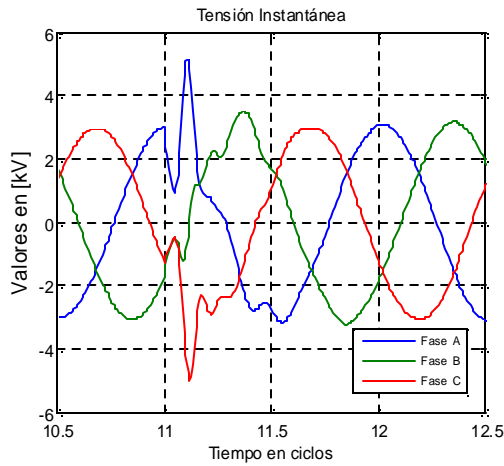
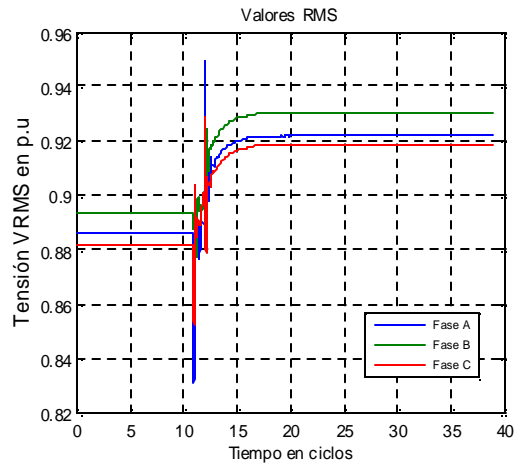




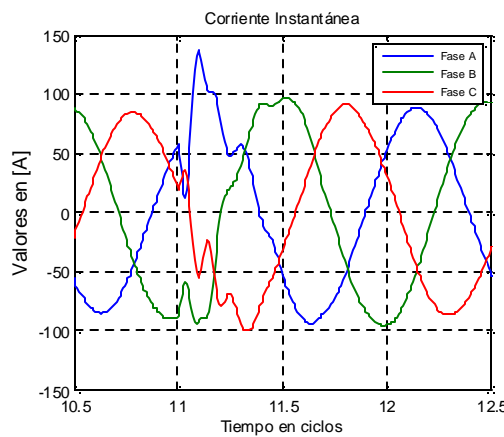
Figura 52. Nodo 890 hacia el motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



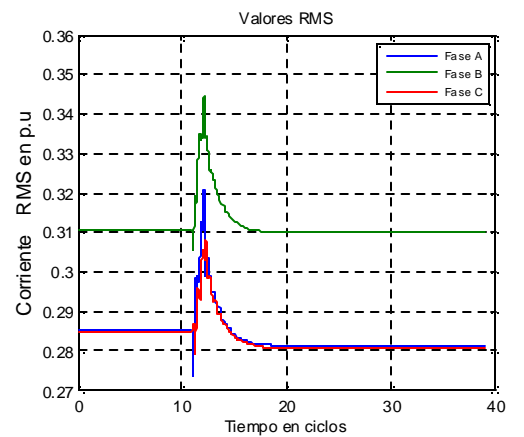
a)



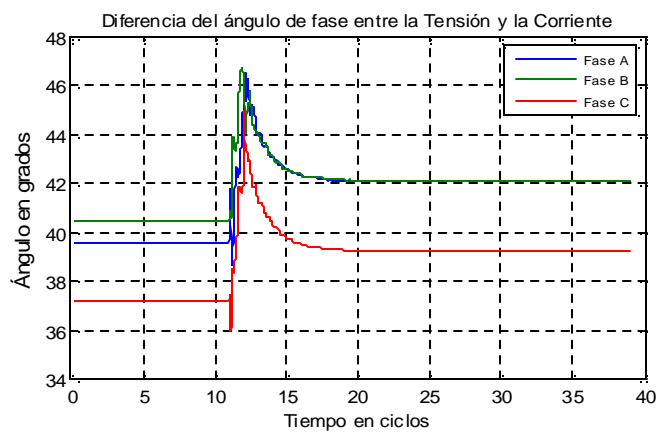
b)



c)



d)



e)

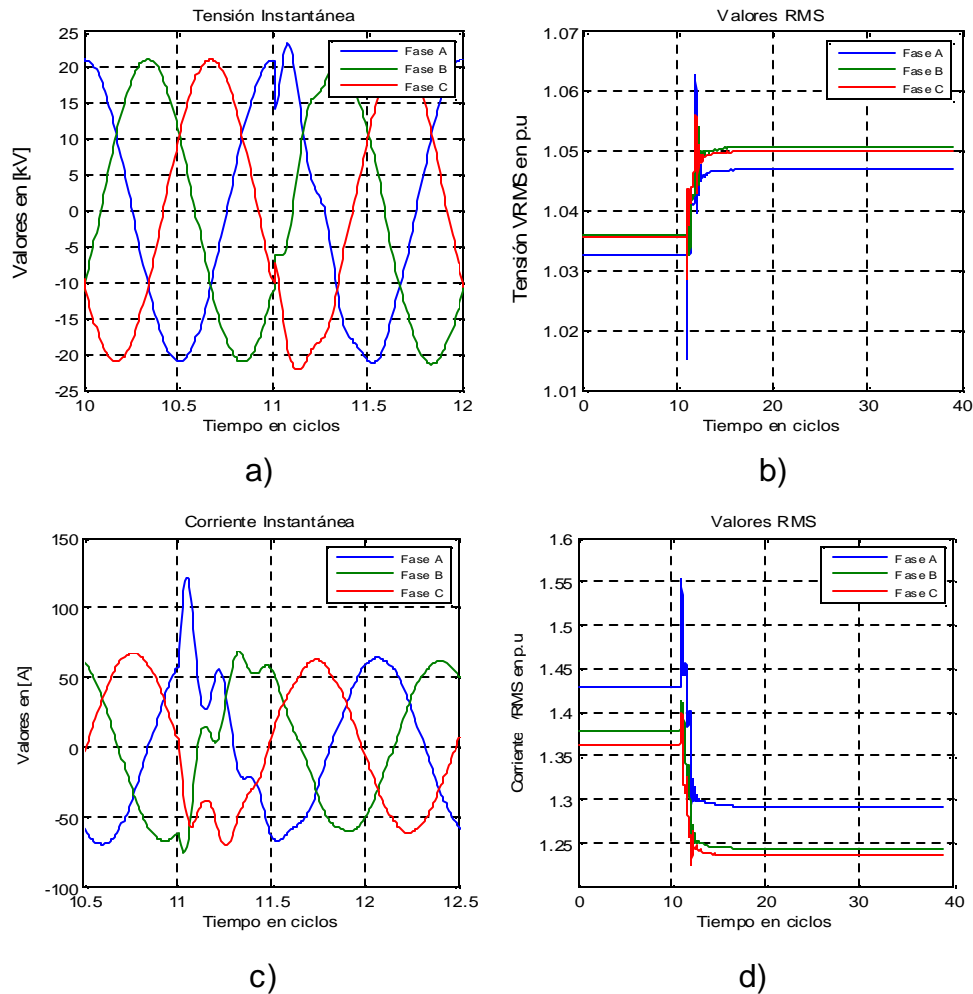


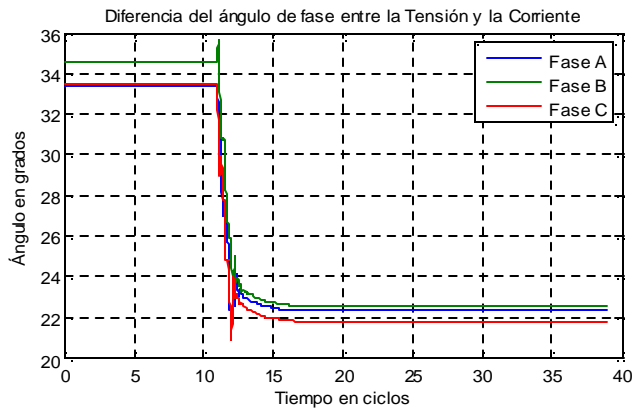
En la cabecera de la subestación (nodo 800), se evidencia claramente un incremento del factor de potencia, de la regulación de tensión y reducción de la corriente del alimentador, Tabla 8 y Figura 53.

Tabla 8. Cambio del factor de potencia nodo 800 Cabecera de la subestación

Fases	fp antes	fp después
Fase A	0.8351	0.9251
Fase B	0.8241	0.9235
Fase C	0.8341	0.9285

Figura 53. Nodo 800, cabecera de la subestación. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.





e)

Observando los resultados de tensión en los diferentes puntos del sistema en el momento de la energización del banco de condensadores, la tensión instantánea se hace aproximadamente nula. Tal efecto no puede ser considerado un hueco de tensión porque su duración es menor a medio ciclo. Luego de la caída instantánea, la tensión del sistema intenta recuperarse excediendo la tensión pico instantánea, el exceso es directamente proporcional a la capacidad del banco de condensadores y a su nivel de carga previo a la energización.

A continuación se describen dos aspectos de interés identificados durante el análisis de los casos 1 y 2:

- Las sobretensiones transitorias pueden ser amplificadas o disminuidas en función del tamaño del banco de condensadores.
- Las sobretensiones y sobrecorrientes transitorias que se observaron durante la energización del banco de capacitor de 200kVAr fueron más altas en frecuencia cuando se comparan a los transitorios relacionados a la energización del banco de condensadores de 100 kVAr.



4.3.2 Caso 3: Energización de un banco de condensadores con un banco previamente energizado

En la práctica se ha comprobado que los picos de corriente originados en la conexión de bancos de condensadores en paralelo alcanzan fácilmente valores de 20 a 250 veces la corriente nominal de los condensadores, bajando a valores insignificantes en tiempos inferiores a un ciclo [14].

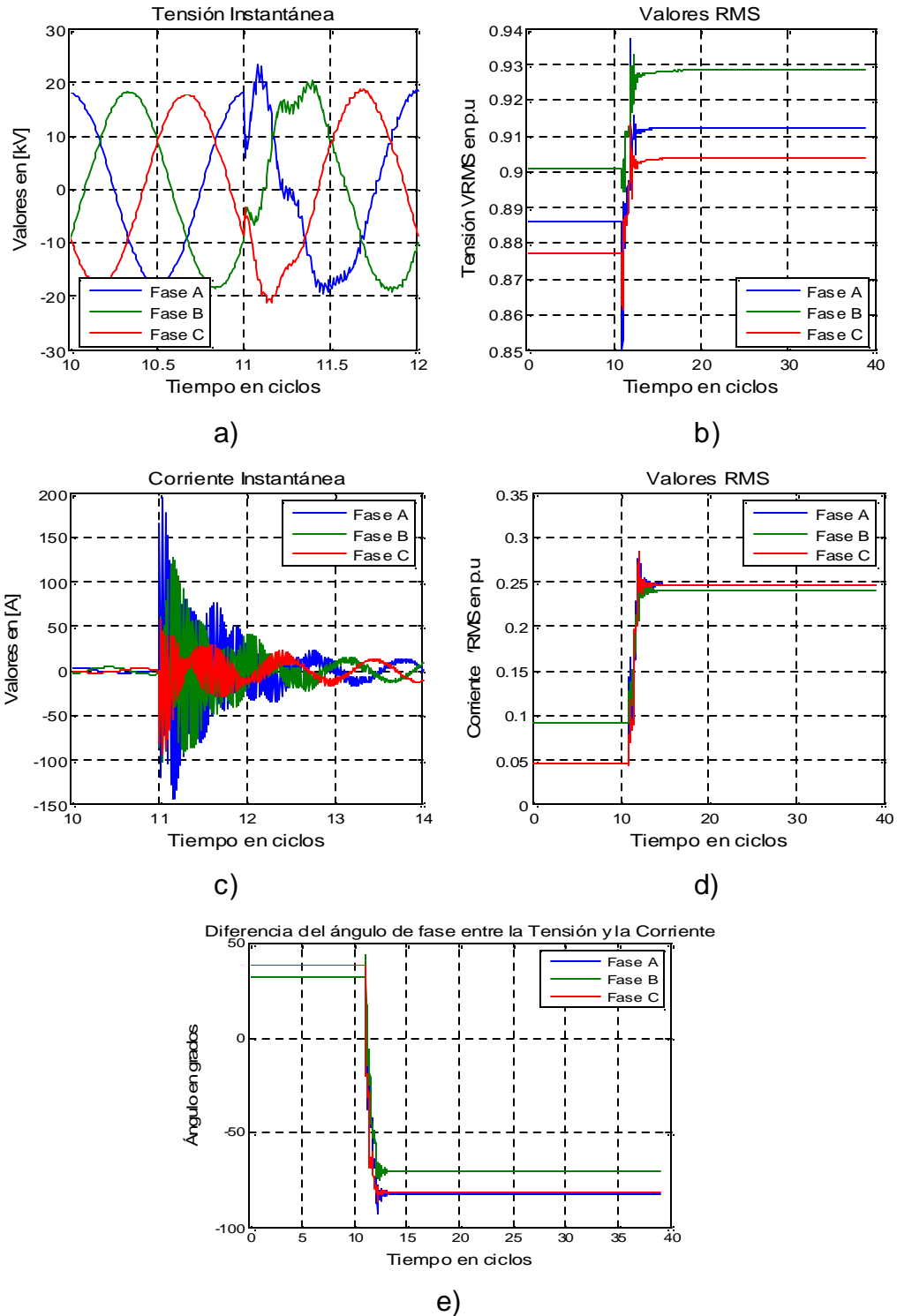
Las oscilaciones transitorias que aparecen durante la energización del capacitor en sistemas eléctricos pueden ser de baja frecuencia (300 a 600 Hz) cuando el banco interactúa con la fuente. Por otro lado, ellos pueden ser de frecuencia media (2 a 10 Hz) cuando el banco es energizado en paralelo con otro banco u otros elementos capacitivos tales como cables [15]. Autores que han contribuido al estudio de sobretensiones armónicas y transitorias debido a energización de condensadores se muestran [16] y [17].

Los resultados significativos que se obtienen al energizar el banco de condensadores en el nodo 848 estando ya operando el banco de condensadores en el nodo 844 se muestran a continuación:

De la Figura 54a se puede ver que la tensión en el instante de la energización su valor no es cero como en el caso 1 y caso 2 ya estudiados, esto a razón de que las condiciones iniciales de energización cambian debido a la presencia de un banco de condensador previamente energizado o cargado. Hay un cambio en el factor de potencia de 0.78 en atraso a 0.13 en adelanto en la fase A, de 0.84 en atraso a 0,33 en adelanto en la fase B y de 0.78 en atraso a 0.15 en adelanto en la fase C, por lo tanto hay un aumento en la corriente Figura 54c-e.



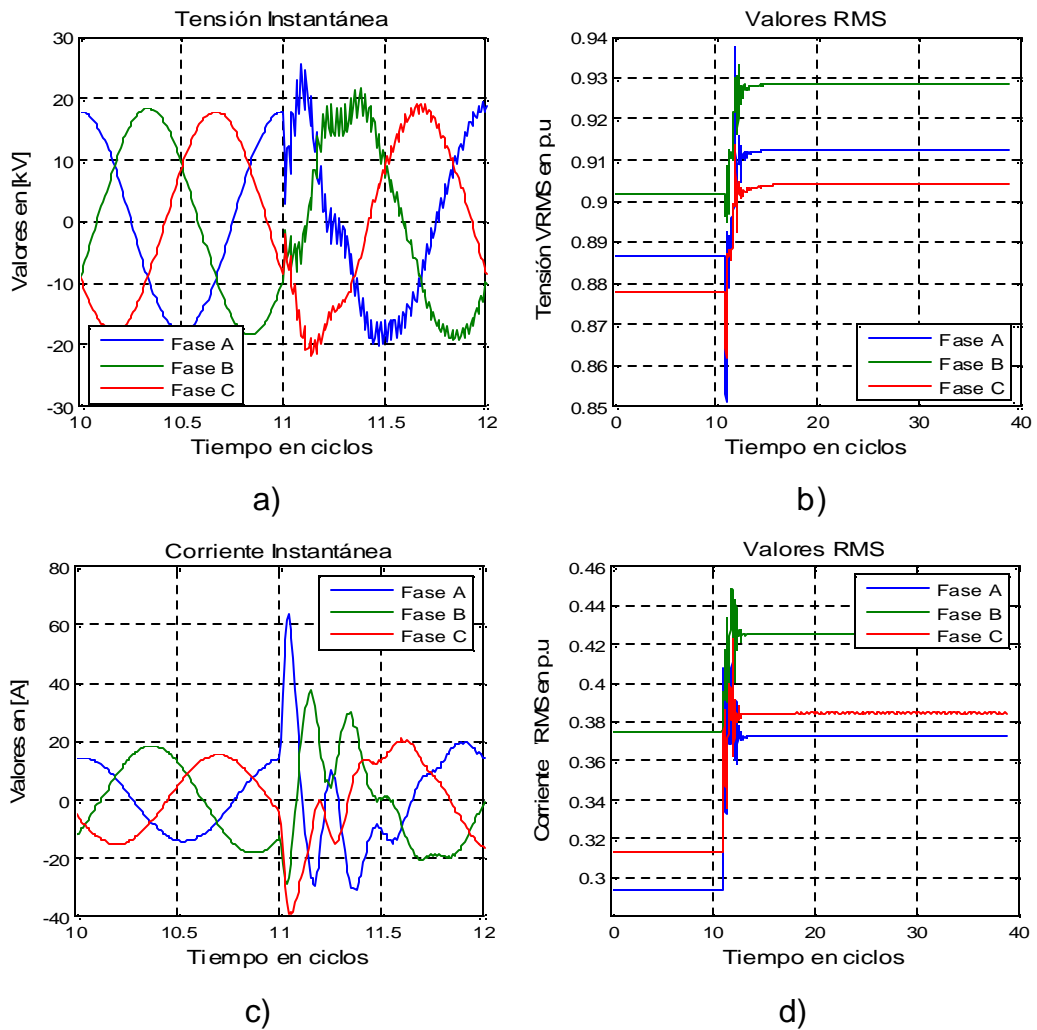
Figura 54. Nodo 846 aguas arriba del banco de condensadores energizado (Nodo 848) y aguas abajo del banco ya energizado (Nodo 844) a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

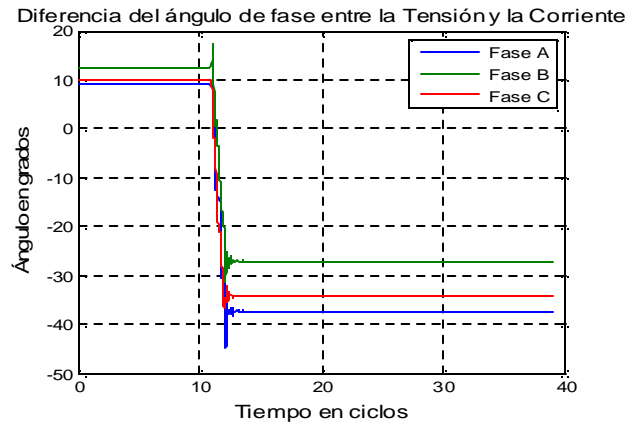




El factor de potencia en el nodo 834 pasa de estar en atraso a adelanto, Figura 55e. El factor de potencia aguas abajo de los condensadores no cambia mientras que en la subestación principal es mejorado de 0.88 a 0.94 en atraso, por tanto hay una disminución en la corriente, Figura 56d.

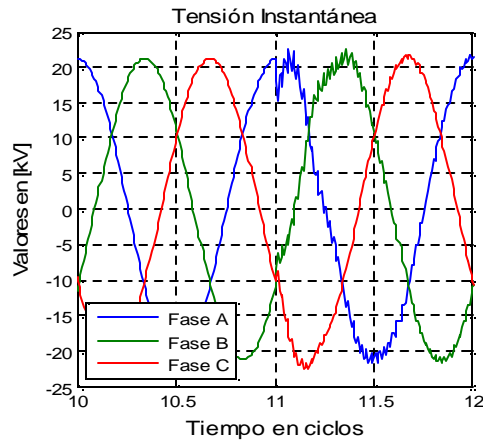
Figura 55. Nodo 834 aguas arriba de los bancos a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



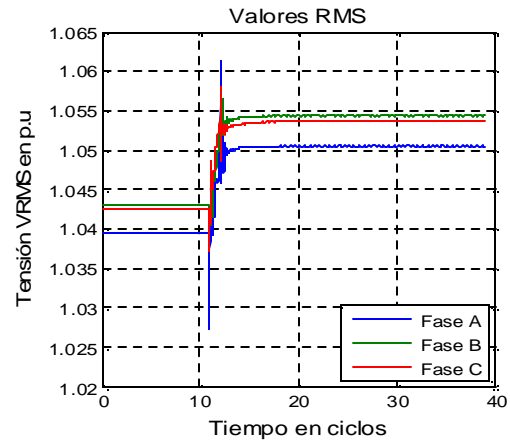


e)

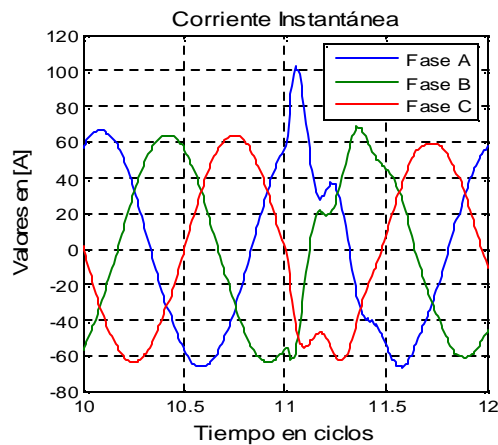
Figura 56. Nodo 800, cabecera de la subestación a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.



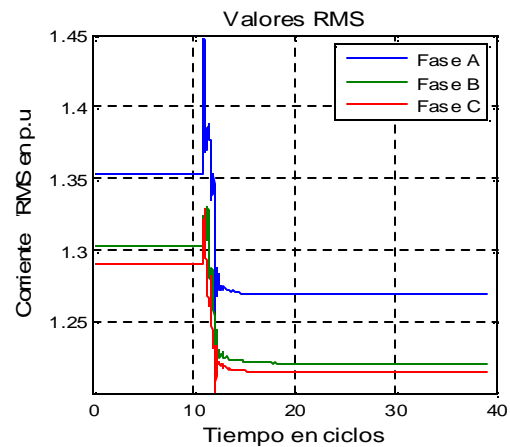
a)



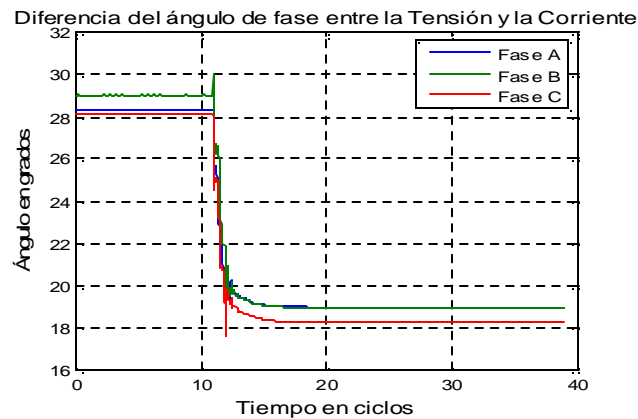
b)



c)



d)



e)

Seguidamente se presenta un resumen de los aspectos de interés identificados en el caso de estudio 3:

- Se presentan transitorios de alta frecuencia (mayores que en el caso 1-2) y prolongados en las ondas de tensión/corriente que se pueden observar hasta 2 ciclos después de la conexión del banco.
- Cuando se energiza un banco de condensadores descargado en la proximidad de otro banco que se encuentra ya operando, el banco cargado descarga una corriente de magnitud de alta frecuencia hacia el banco descargado; esto indica que el cortocircuito aparente provocado por la conexión del banco es alimentado prácticamente en su totalidad por la energía almacenada en el banco que ya se encuentra operando (Nodo 844). Esto se debe a que la reactancia inductiva entre los bancos de condensadores, normalmente es mucho menor que la reactancia inductiva interpuesta entre los condensadores y la fuente. Esta corriente ocurre entre los bancos en paralelo pero no es vista por el sistema como se muestran en la Figura 55, Figura 56 y demás obtenidas en diferentes puntos del sistema.
- El pico de corriente máximo que toma el banco en el Nodo 848 ocurre cuando se energiza encontrándose la red a su tensión pico (Fase A Figura 54a y Figura 54c).



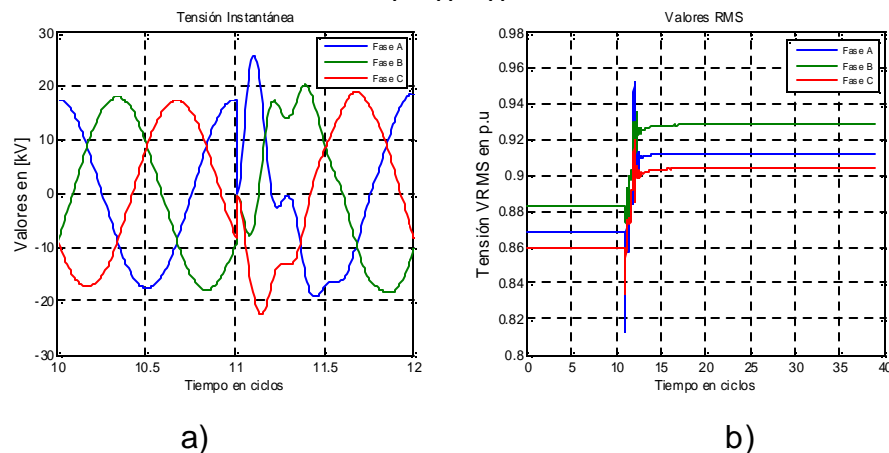
En la práctica son utilizadas algunas técnicas basadas en la reinserción de inductores y resistores con la intención de reducir las sobretensiones transitorias debidas a la energización de bancos de condensadores [18].

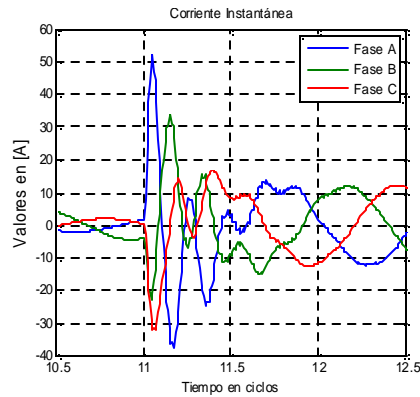
4.3.3 Caso 4: Energización de ambos bancos al mismo instante de tiempo

También conocido como energización síncrona. Los resultados significativos que se obtienen en este caso se muestran a continuación:

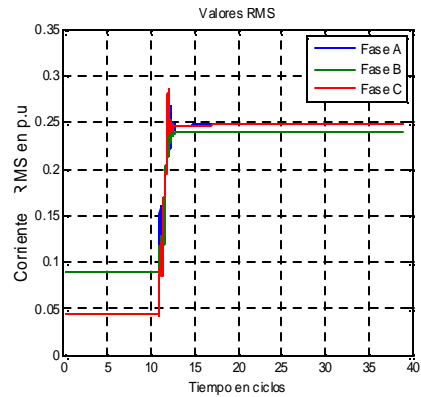
Como en los casos 1-2 ya estudiados, los bancos de condensadores como están descargados, al energizarlos estos toman corrientes transitorias elevadas, Figura 57c. Además se comportan como cortocircuitos ya que la tensión en sus terminales es cero. Como están siendo cargados, la tensión instantánea se eleva y rebasa momentáneamente la tensión, Figura 57a. Hay un cambio en el factor de potencia como ya se menciona en el caso 3 estudiado. Este caso es una solución al problema de los transitorios que se presentan en el caso 3, como se muestran en las siguientes figuras, por tanto con respecto al cierre sincrónico, los transitorios se reducen considerablemente.

Figura 57. Nodo 846, nodo entre ambos bancos de condensadores. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.

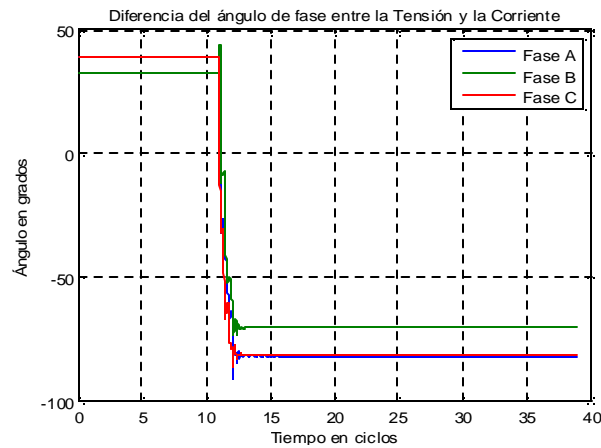




c)



d)

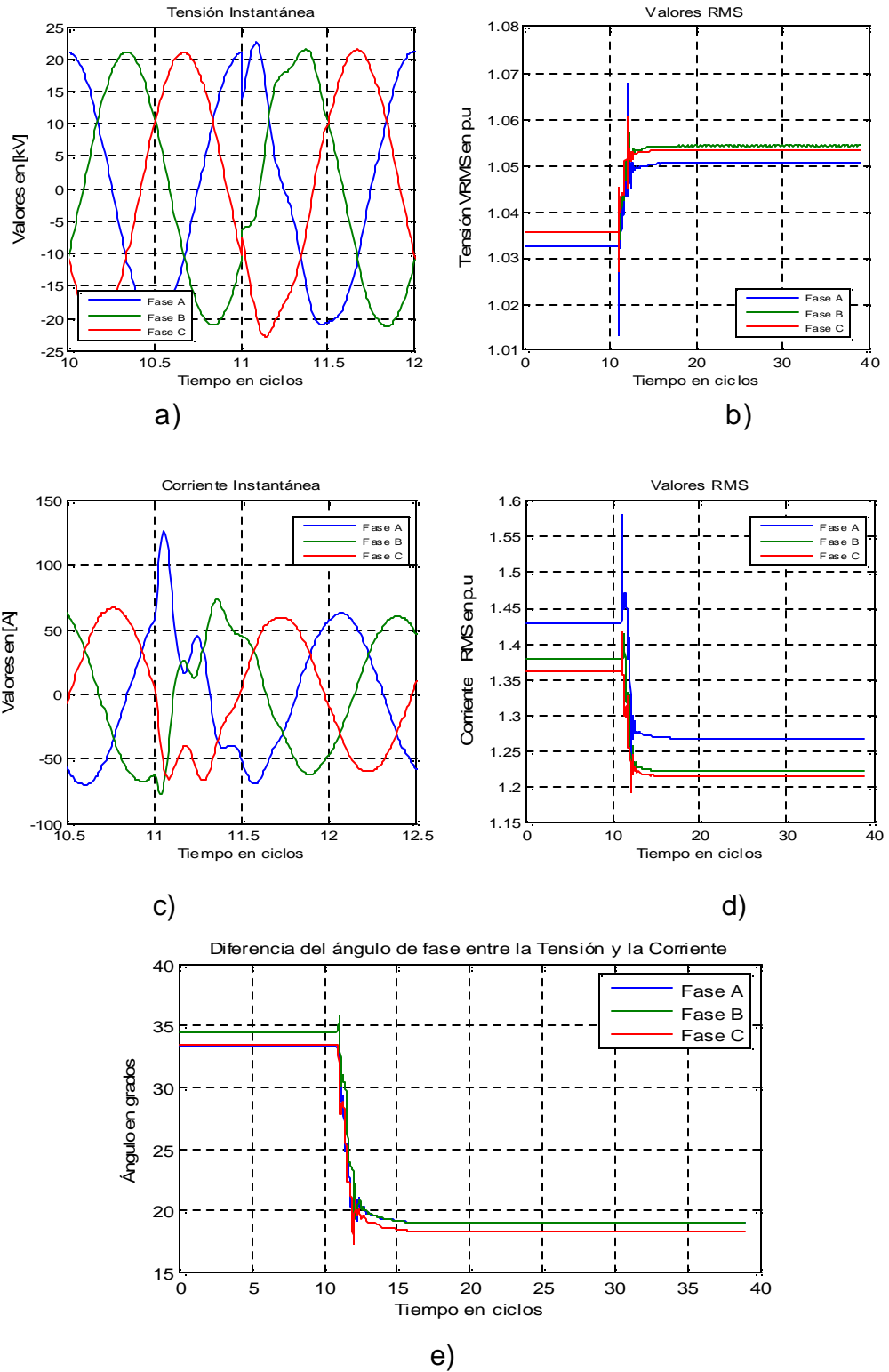


e)

El factor de potencia aguas abajo de los condensadores no cambia mientras que en la subestación principal es mejorado de 0.88 a 0.94 en atraso como en el caso 3, ya que se entrega la misma potencia reactiva al sistema, por tanto hay una disminución en la corriente y aumento en la tensión, Figura 58..



Figura 58. Nodo 800, cabecera de la subestación a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$.





4.4 PROPAGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN DEBIDOS A FALLAS DE RED

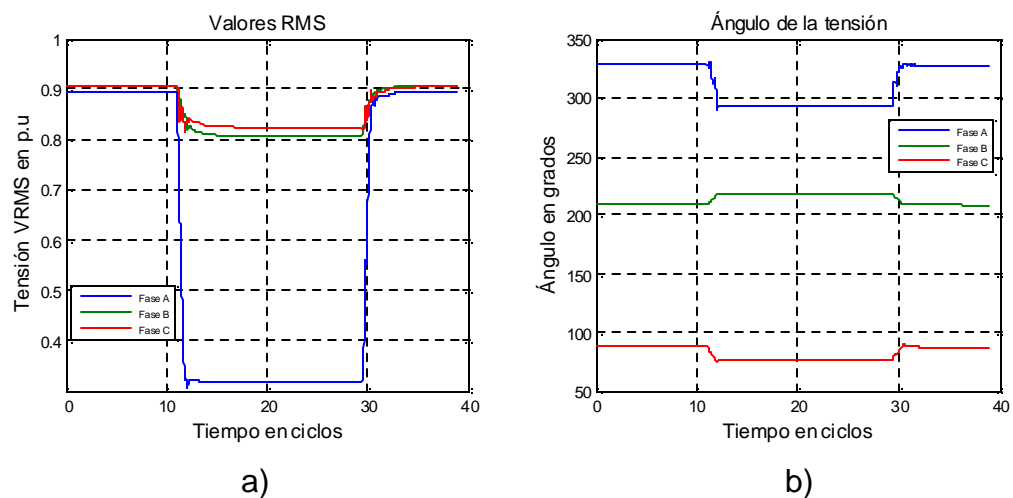
En esta sección analizaremos la propagación de huecos de tensión en el sistema debidos a fallas de red en el sistema eléctrico.

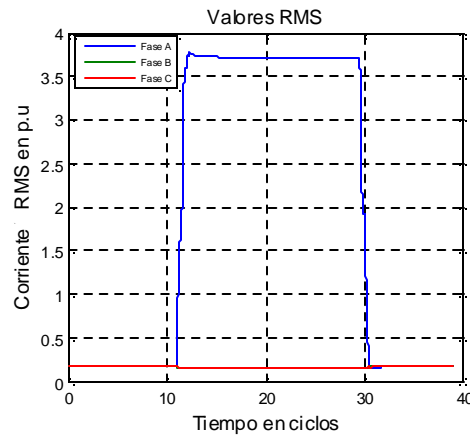
4.4.1 Falla monofásica nodo 862

Se realiza una falla monofásica en la fase A con una resistencia de falla de 1Ω en el nodo 862, lado de baja del transformador.

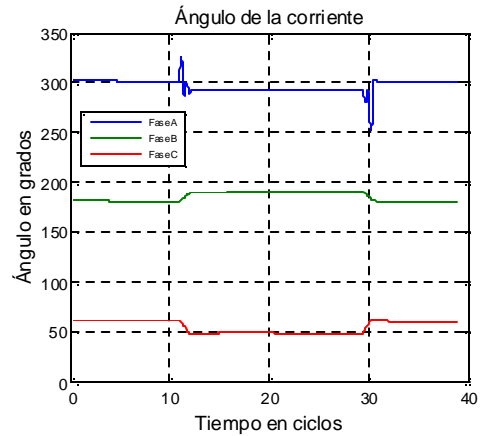
Se puede ver en la Figura 59 que la tensión durante el evento en la fase A es de 0.31 p.u la cual es la fase bajo falla y la tensión en las fases B y C se reducen un poco, a 0.80 y 0.82 respectivamente. En el diagrama fasorial de tensiones se puede observar un salto de ángulo durante el evento el cual es de -35° , $+8^\circ$, -11° en las fases a, b y c respectivamente. Los valores negativos en los grados indican un atraso y el signo positivo un adelanto con respecto a la tensión pre-falla. Del diagrama fasorial se puede ver que este tipo de hueco corresponde a un hueco tipo B. La corriente en la fase fallada durante el evento alcanza un valor de 3.7 p.u.

Figura 59. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.

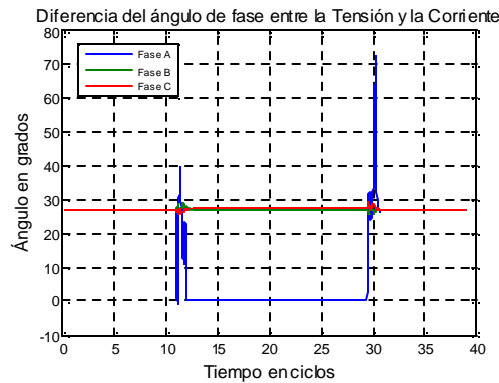




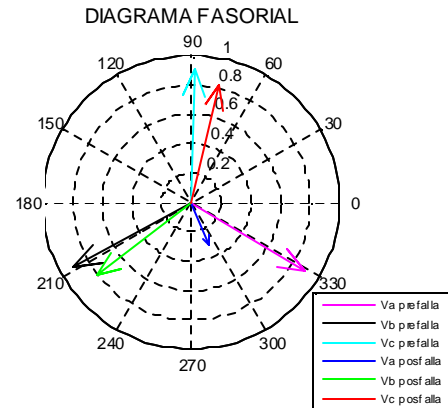
c)



d)



e)

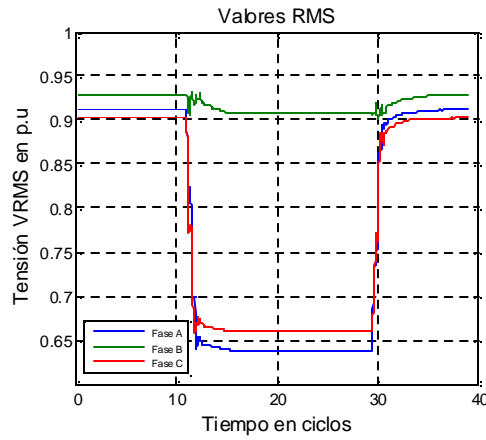


f)

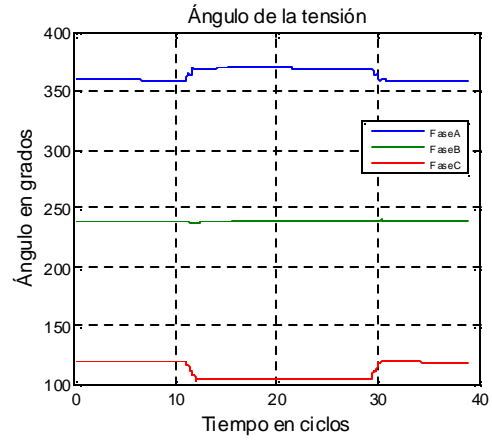
En cuanto a su propagación, el hueco de tensión pasa a través de un transformador tipo 3 (ΔY_1) Nodos (836-862), el cual hace que el hueco de tensión se registre en el nodo 836 (Lado de alta del transformador) como una falla bifásica, tipo C, Figura 60f. La conexión del transformador (ΔY_1), causa una recuperación en la tensión de la fase B, mientras que las tensiones que caen son las de las fases A y C, lo cual hace que las corrientes en las fases A y C se eleven a 2.16 p.u y 2.18 p.u respectivamente.



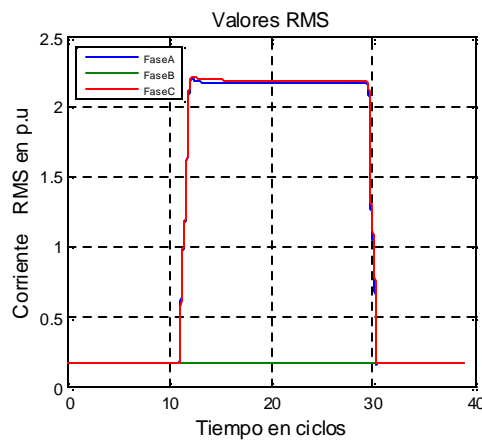
Figura 60. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta_v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta_i(t)$ e) $\theta_v(t)-\theta_i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.



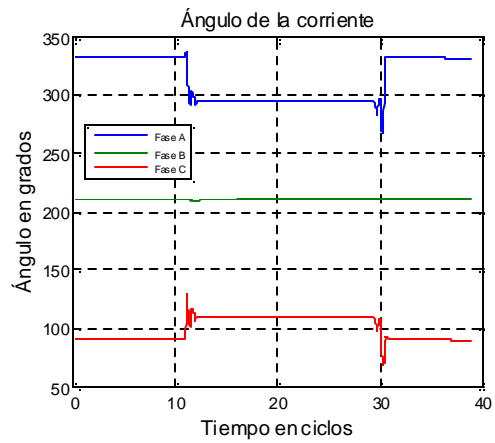
a)



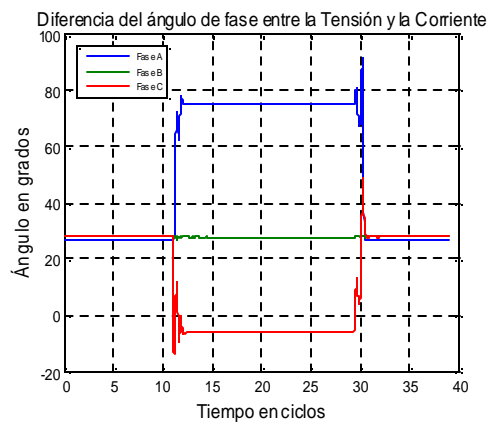
b)



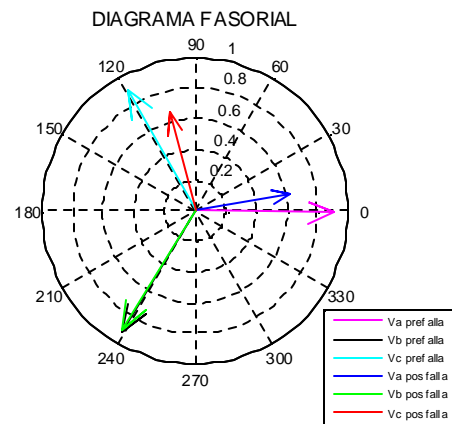
c)



d)



e)



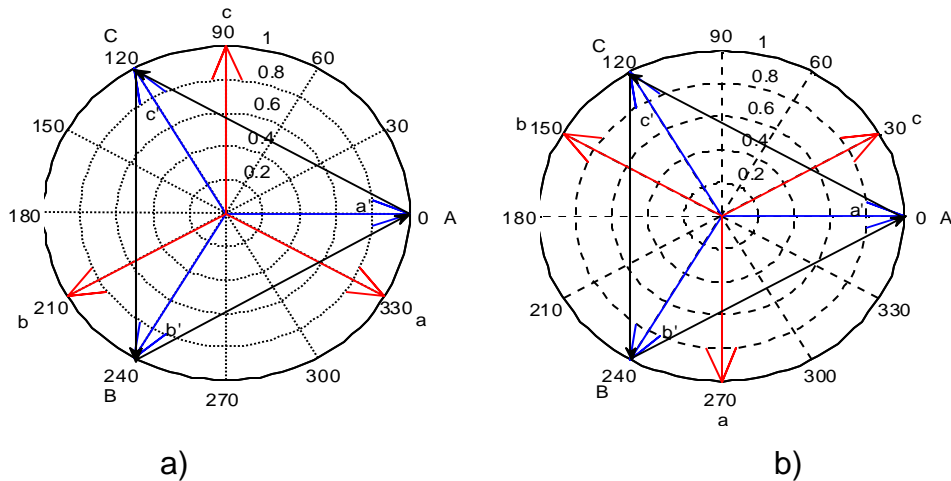
f)



El motivo por el cual se recupera la fase B se explica a continuación:

Consideremos el caso del transformador Dy1 y el transformador Dy3, sus diagramas fasoriales correspondientes a cada grupo de conexión se muestran en la Figura 61.

Figura 61. Diagrama Fasorial de tensiones a) Grupo de conexión Dy1 b) Grupo de conexión Dy3



Para el diagrama fasorial de tensiones Dy1 y Dy3 las tensiones del lado delta se relacionan con las de fase así:

Se relaciona los fasores del lado de la estrella con los del lado de la delta como se muestra en la tabla 7.

Tabla 9. Transferencia falla monofásica Transformador Tipo 3

Conexión Dy1	Falla monofásica	Falla Bifásica
V_a en contrafase con V_{CA}	Fase a	Fase C-A
V_b en contrafase con V_{AB}	Fase b	Fase A-B
V_c en contrafase con V_{BC}	Fase c	Fase B-C
Conexión Dy3	Falla monofásica	Falla Bifásica
V_a en fase con V_{BC}	Fase a	Fase C-A
V_b en fase con V_{CA}	Fase b	Fase A-B
V_c en fase con V_{AB}	Fase c	Fase B-C



Si existe una falla monofásica en la fase A del lado de la estrella esta se ve como una falla bifásica (fases A-C) si es un transformador Dy_1 y (fases B-C) si es un transformador Dy_3 como se muestra en la Tabla 9.

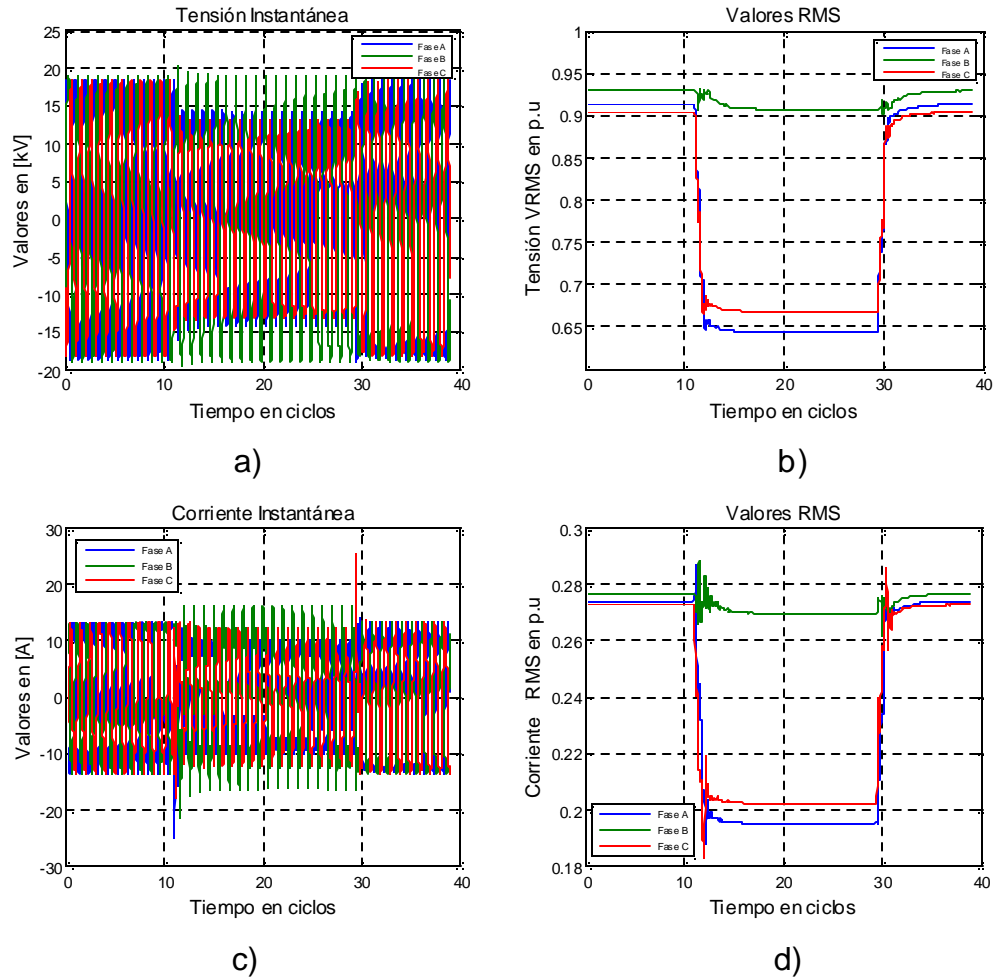
En conclusión los índices horarios no influyen puesto que solo suponen un giro de 120° entre las tensiones de primario y secundario (que equivale a renombrar las fases del secundario).

Durante su propagación el hueco de tensión sigue siendo tipo C debido a que no existe un transformador que lo haga cambiar de tipo. Las líneas ayudan a la recuperación del hueco a medida que se va acercando a la cabecera de la subestación pero no afectan el ángulo de tensión significativamente desde la cabecera de la subestación hasta el lado de alta de transformador, el desfase es de 4° aproximadamente tensión pre-falla.

Los transitorios que se presentan en las corrientes que fluyen por el ramal 834-848 son debidas al cambio instantáneo de la tensión en los terminales de los bancos de condensadores en los nodos 844 y 848, lo cual provoca un cortocircuito instantáneo lo que genera unas corrientes transitorias de la forma obtenida Figura 62. La corriente en este ramal (834-848) disminuye debido a que la corriente que fluye entre la fuente y el nodo 862 (donde ocurrió la falla) aumenta, ya que la fuente alimenta el corto y por tanto en los ramales derivados a este ramal la corriente disminuye, tal y como se explicó en la sección anterior.



Figura 62. Nodo 848. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$.

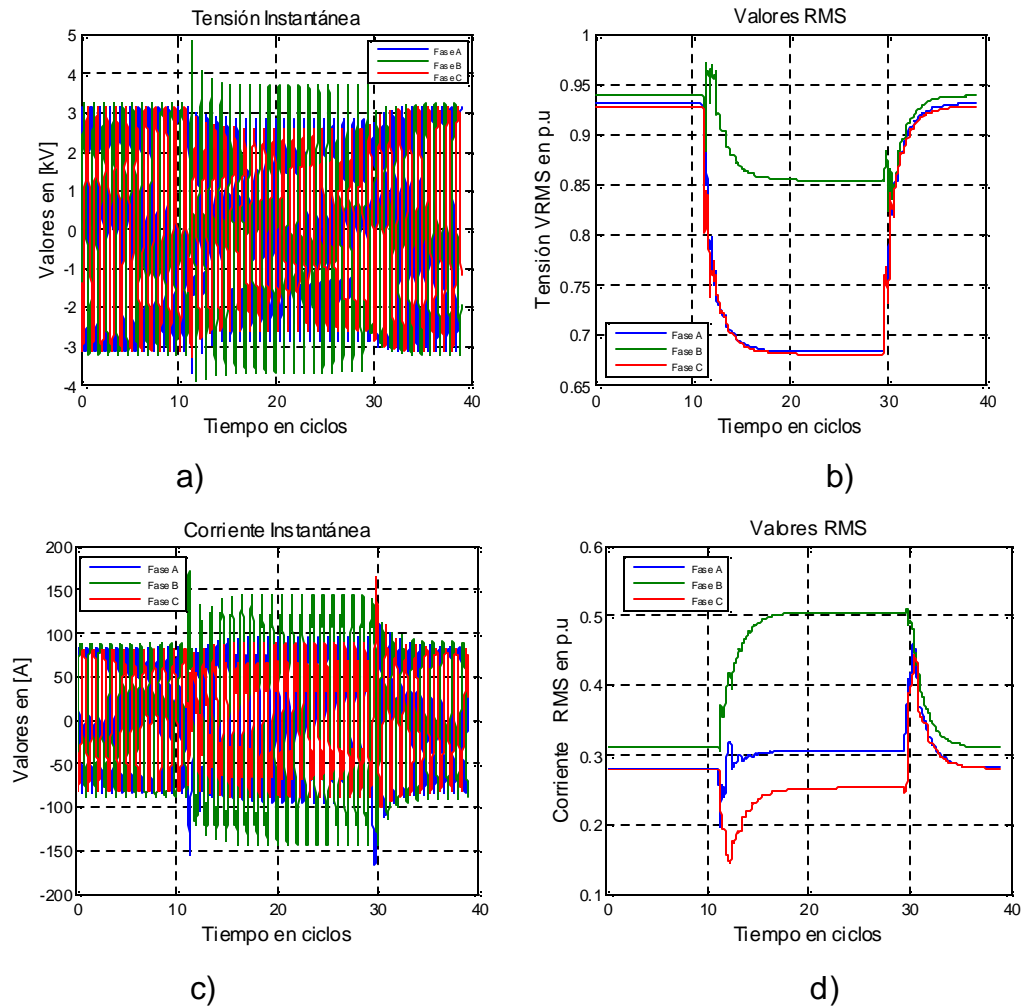


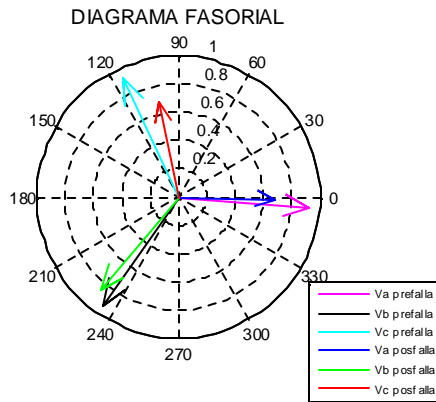
Se puede observar en las gráficas obtenidas el efecto que tiene el motor sobre el evento en el nodo A 890, Figura 63. En cuanto a la gráfica de la tensión RMS se observa que en el instante que ocurre la falla el motor se comporta como un generador y trata de mantener la tensión en sus terminales. El hueco de tensión en el lado de alta del transformador nodo 832 es tipo C y el transformador es tipo T1 el hueco en los terminales del motor sigue siendo tipo C como se observa en la Figura 63.e, por lo tanto la corriente que más se eleva es la de la fase B para lograr equilibrar las tensiones en las terminales del motor Figura 63.c, seguido de un pequeño transitorio las tensiones se estabilizan y en el momento en el que se



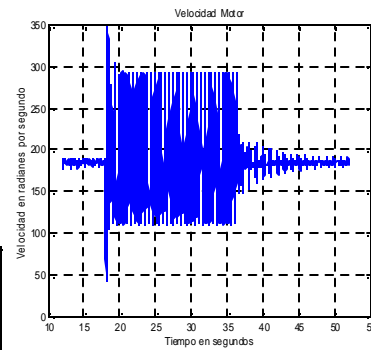
extingue la falla el motor se comporta de la misma forma que en el arranque haciendo que el hueco se prolongue por unos cuantos ciclos más.

Figura 63. Nodo 890 terminales del motor. a) $v(t)$ b) $v_{rms}(t)$ c) $i(t)$ d) $i_{rms}(t)$. e) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla f) velocidad del motor.





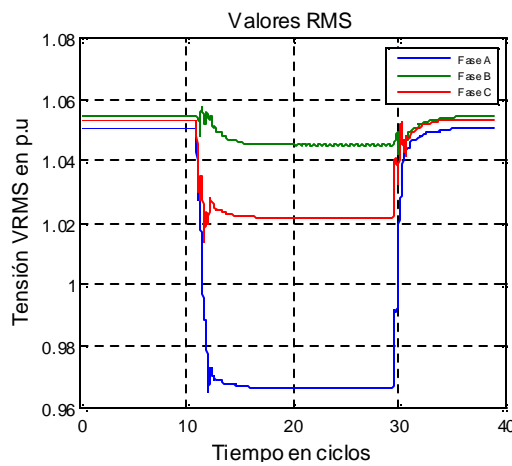
e)



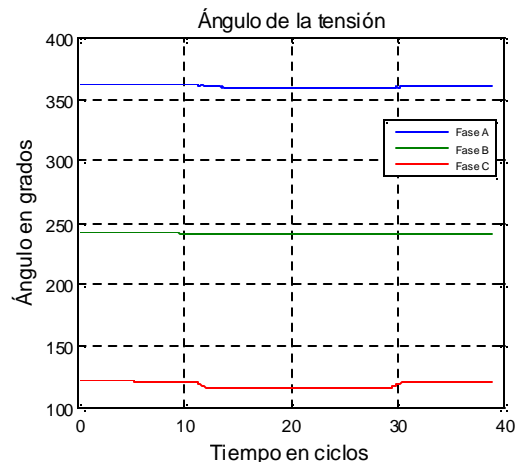
f)

El hueco de tensión monofásico en el nodo 862 (tipo B) llega a la cabecera de la subestación (Nodo 800) como un hueco de tensión bifásico (tipo C*) con una tensión en las fases A, B y C de 0.96, 1.045 y 1.021 respectivamente. En este punto la diferencia de tensión es menor al 10% por tanto ya no se considera como hueco de tensión.

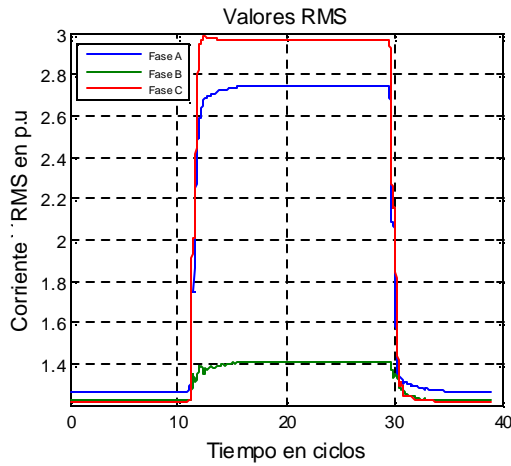
Figura 64. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) vrms(t) b) $\theta v(t)$ c) irms(t) d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.



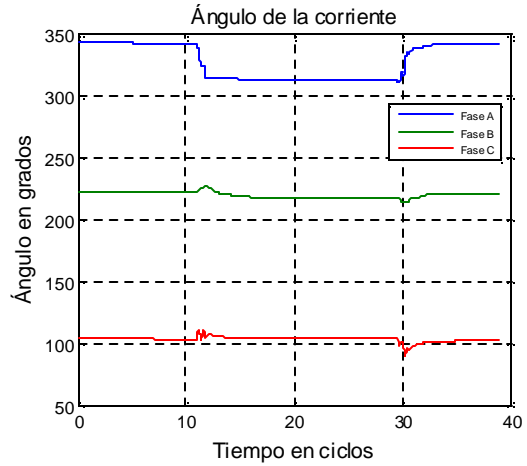
a)



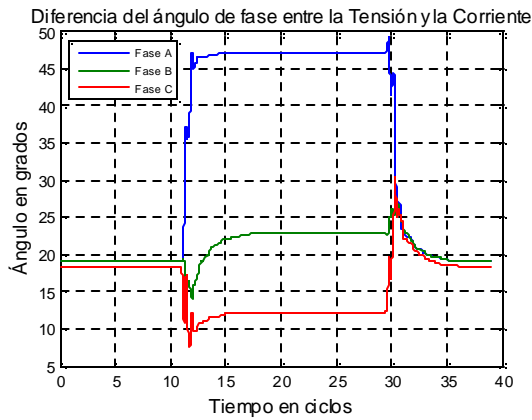
b)



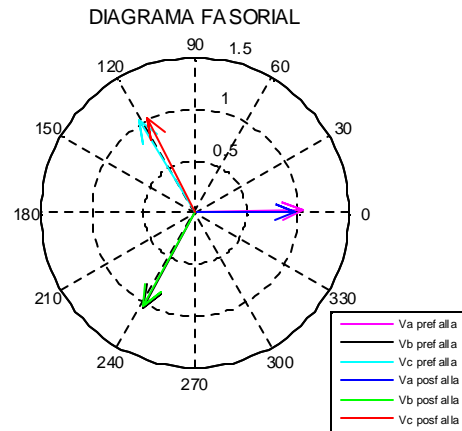
c)



d)



e)



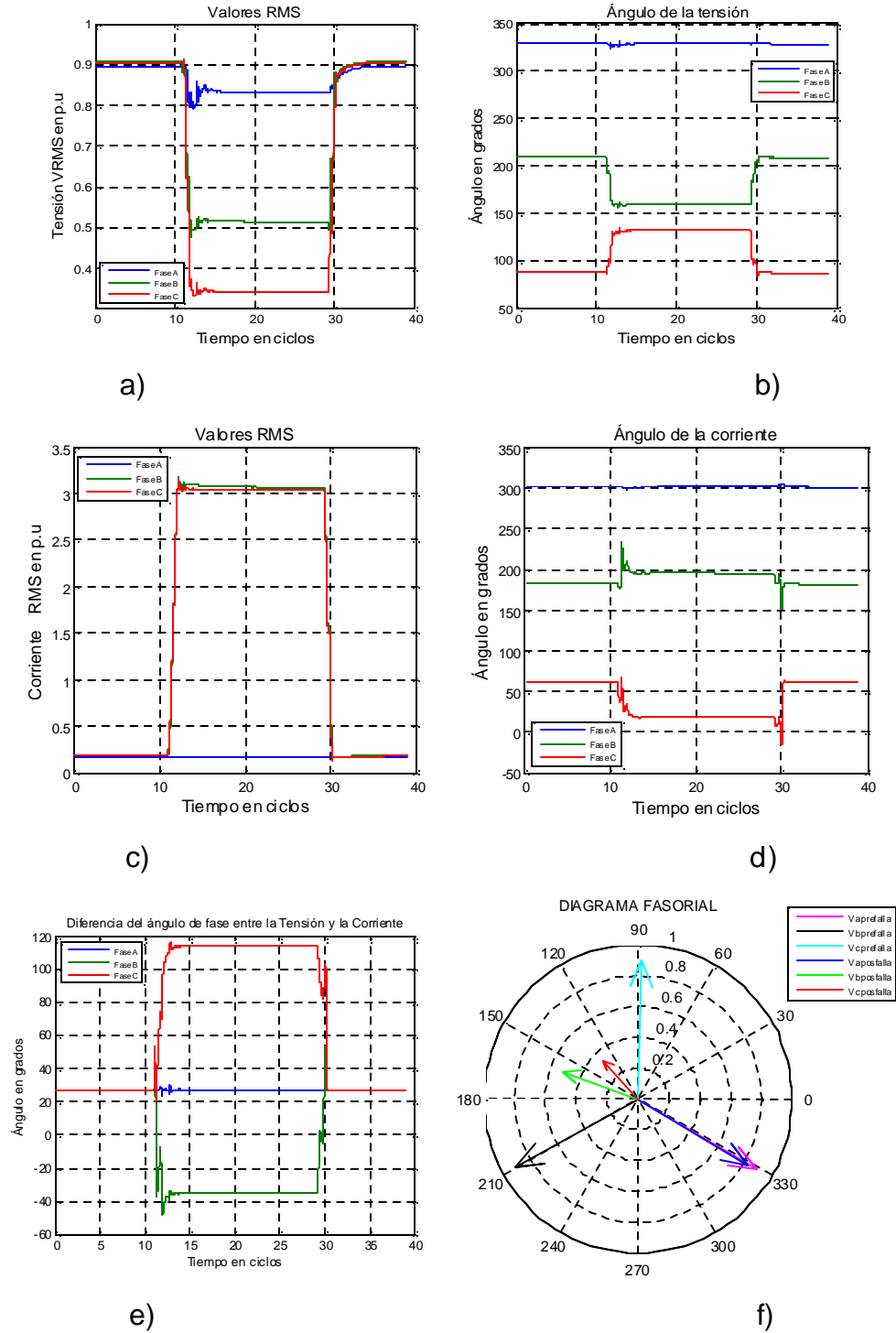
f)

4.4.2 Falla bifásica nodo 862

Se realiza una falla bifásica entre las fases B y C con una resistencia de falla de 1Ω en el nodo 862, lado de baja del transformador. En el lado de baja del transformador se presenta una caída en las tensiones B y C de 0.51 p.u y 0.34 p.u y un salto de ángulo de -49.3° y 44° respectivamente. En la fase A existe una pequeña caída de tensión del 6.7% y no presenta salto de ángulo. Según el diagrama fasorial este es un hueco de tensión tipo C. Durante el evento la magnitud de la corriente alcanza valores de hasta 18 veces su valor en estado estable.



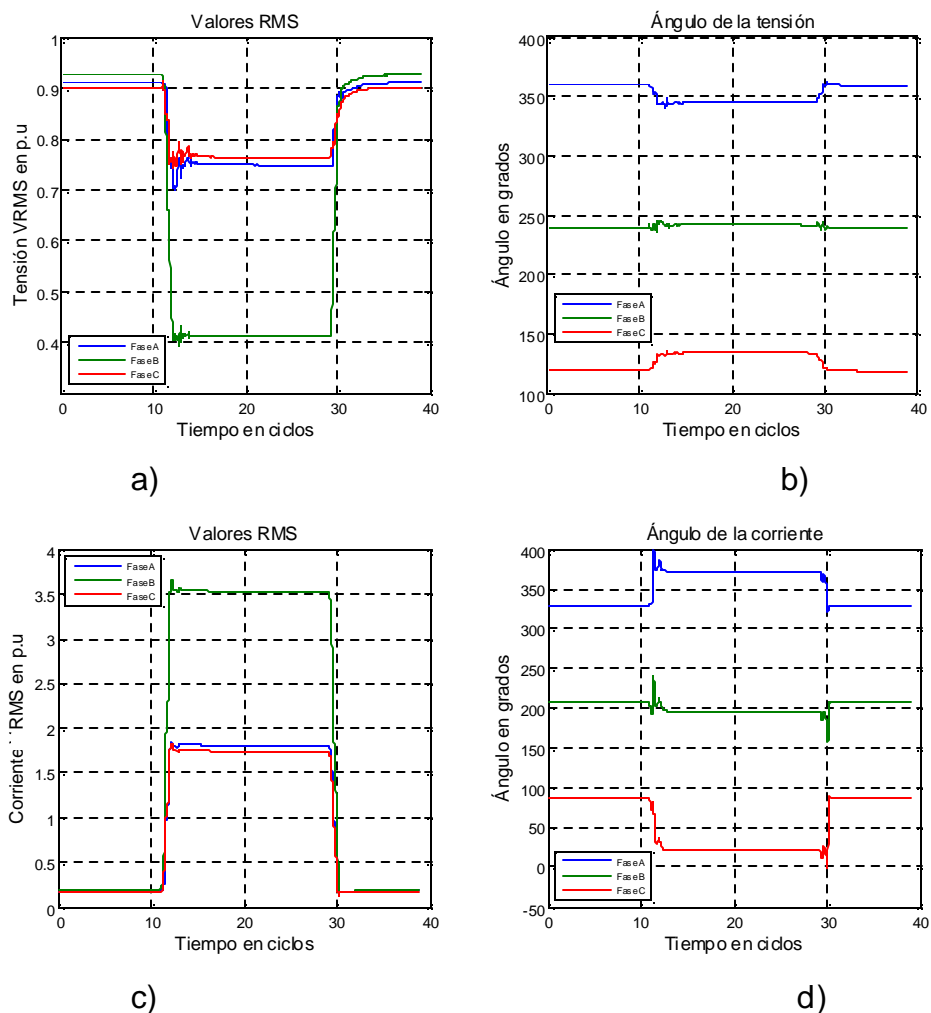
Figura 65. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.

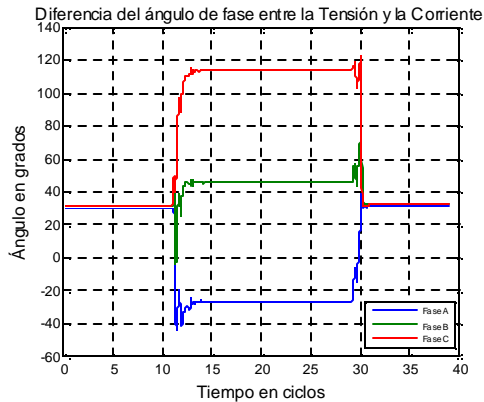




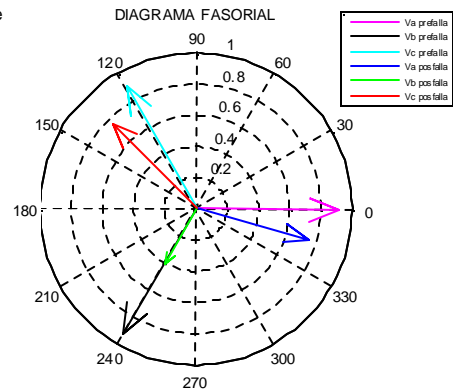
En cuanto a su propagación, el hueco de tensión tipo C en el lado de baja del transformador se convierte en un hueco tipo D en el lado de alta del mismo (ΔY_1). Como se presenta en la Figura 66, la magnitud de la tensión en las fases A, C y sus saltos de ángulos son de 0.75 p.u, 0.76 p.u y -14.5° , 15.1° respectivamente. En la fase B se presenta una caída del 55% y un salto de ángulo de 2° debido a que es un hueco tipo D. El valor más elevado de corriente lo presenta la fase B con un valor de 3.52 p.u, Las corrientes de las fases A y C alcanzar a tomar valores de hasta 1.8 p.u es decir 10 veces la corriente nominal (Nodo 836) Figura 66.

Figura 66. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla.





e)



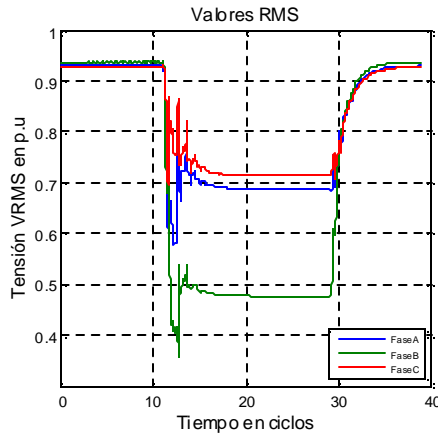
f)

Los Nodos 836-840 presentan un ramal derivado, en el cual el hueco de tensión sigue siendo tipo D pero las corrientes decrecen en el momento de la falla. El valor de corriente que más decreció fue la de la fase B con un 44% con respecto a la corriente nominal.

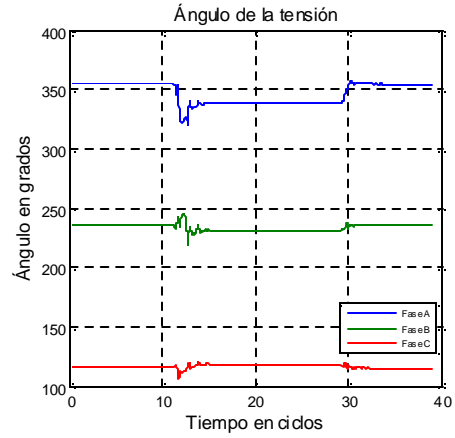
El hueco de tensión tipo C al propagarse por la red llega a los terminales del motor como un hueco tipo D debido a que este pasa primero por un transformador tipo 3 y luego por uno tipo 1 que es el transformador que alimenta al motor, el transformador T1, no afecta la forma del hueco, por tanto el hueco sigue siendo tipo D en los terminales del motor Figura 67f. El efecto del motor sobre el hueco hace que las formas de onda de tensión y corrientes sufran transitorios justo después de presentarse la falla y del despeje de la misma. Justo después de la falla el motor trata de mantener la tensión en sus terminales elevando las corrientes de las fases A y C alcanzando valores de casi 3 veces su corriente nominal Figura 67. Como era de esperarse se presenta una caída en el nivel de velocidad del motor justo después del instante de inserción de la falla y posteriormente oscilaciones de alta frecuencia de la velocidad hasta que ocurre el despeje de la falla en el sistema Figura 67g.



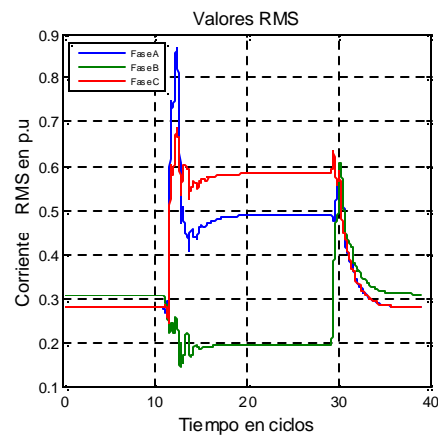
Figura 67. Nodo 890 terminales del motor. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.



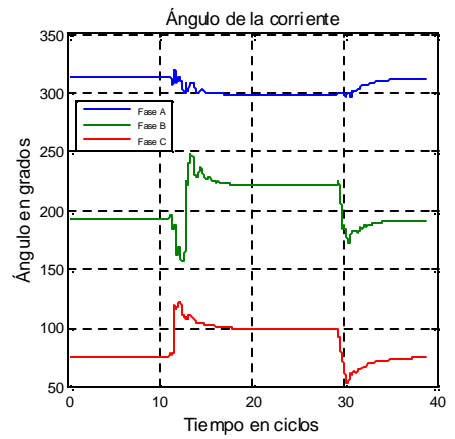
a)



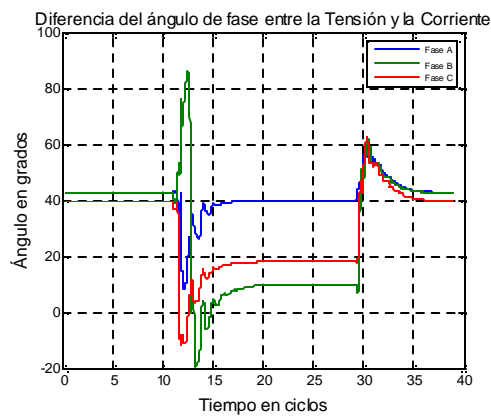
b)



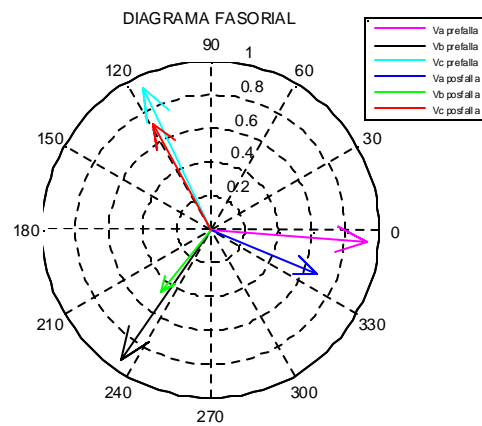
c)



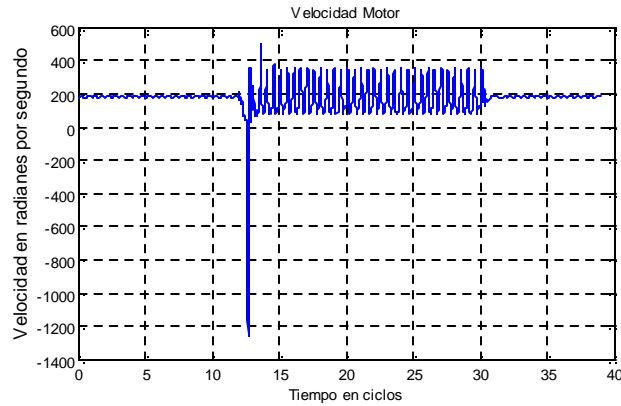
d)



e)



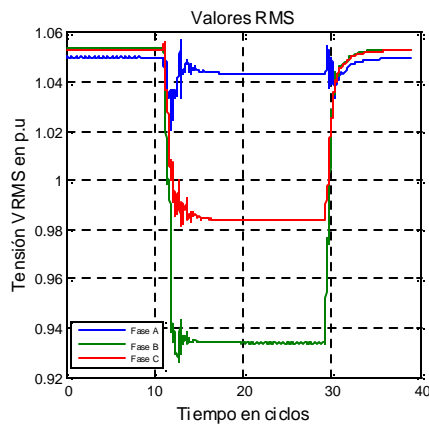
f)



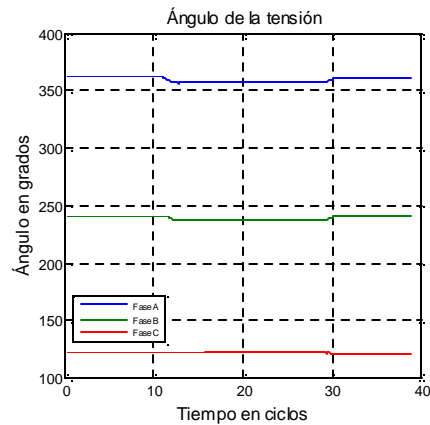
g)

El hueco de tensión tipo C es registrado en la cabecera de la subestación (Nodo 800) como un tipo D (falla monofásica). El nodo 800 presenta una tensión en las fases A, B y C de 1.04, 0.93 y 0.98 respectivamente. En este punto la mayor diferencia de tensión la presenta la fase A del orden del 12% respecto a las condiciones de estado estable Figura 68.

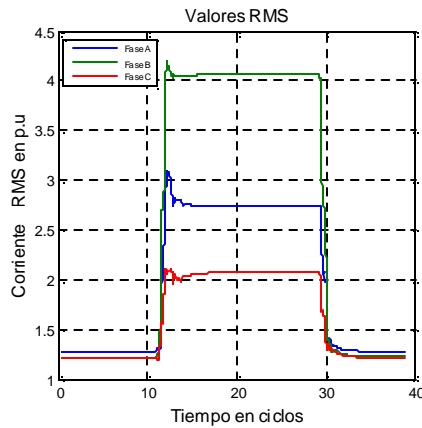
Figura 68. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.



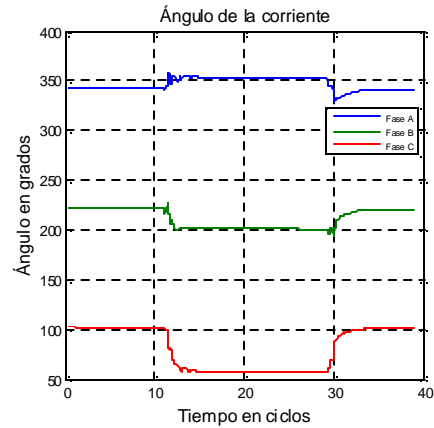
a)



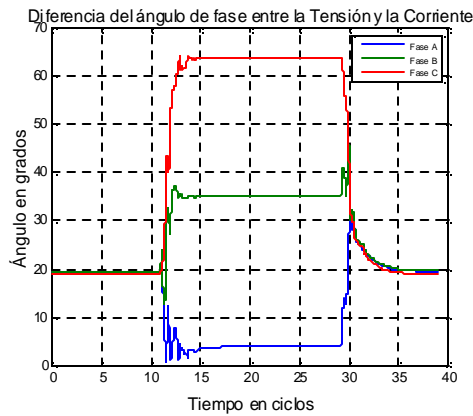
b)



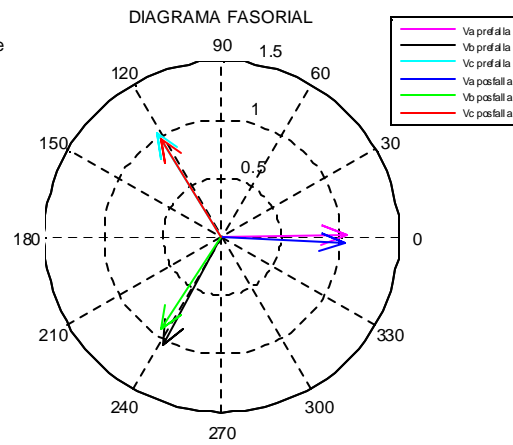
c)



d)



e)



f)

4.4.3 Falla bifásica a tierra nodo 862

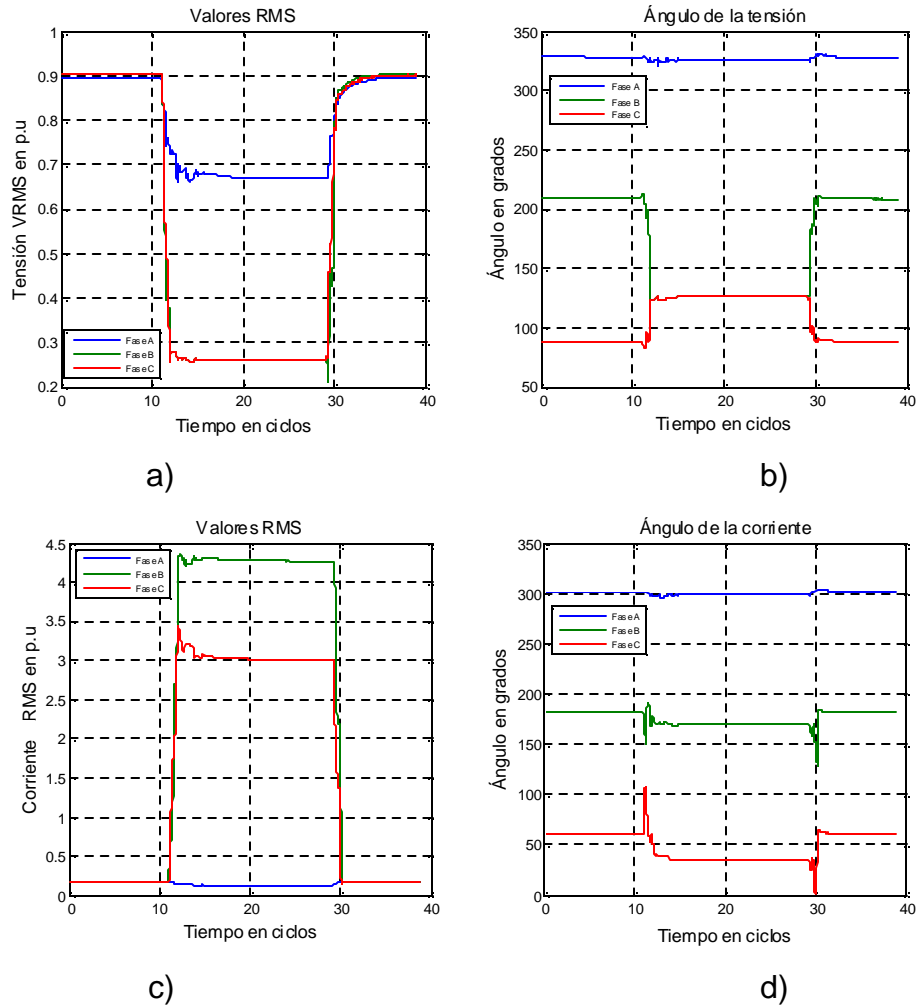
Se realiza una falla bifásica entre las fases B y C con una resistencia de falla de 1Ω en el nodo 862, lado de baja del transformador.

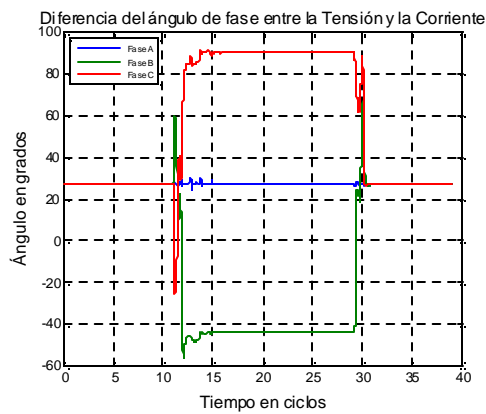
La diferencia entre la falla bifásica y bifásica a tierra radica en que en la segunda en el punto de la causa nodo 862, las fases falladas B y C presentan la misma caída y el mismo ángulo de fase 0.25 p.u y 124.2° mientras que en la primera no, esto se puede observar en las Figura 65 y Figura 69. La fase A presenta una caída de tensión del 25% con base a las condiciones de estado estable y un salto de ángulo de -2° .



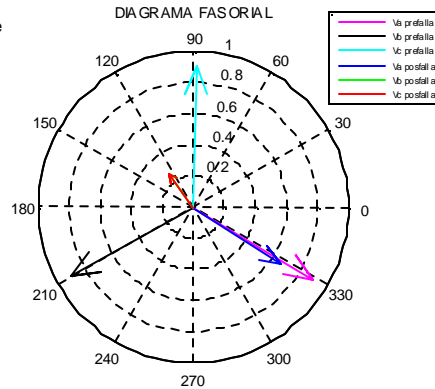
En cuanto a la magnitud y salto de ángulo de las corrientes de las fases B y C, muestran valores diferentes debido a la topología del sistema el cual no es equilibrado en las tres fases Figura 69c y Figura 69d.

Figura 69. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.





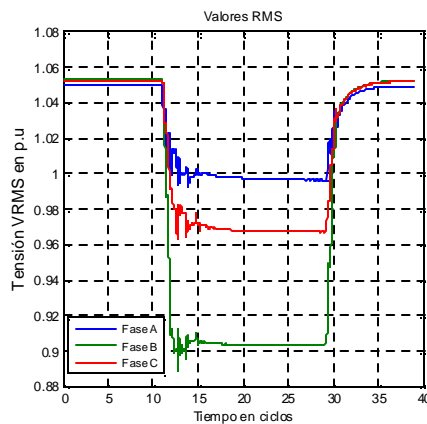
e)



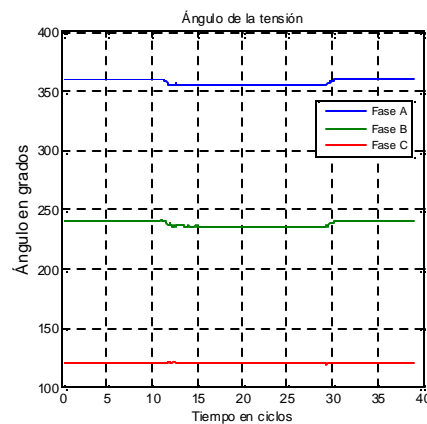
f)

Se observa una caída del 14% en la fase B la cual es la más profunda debido a que en este nodo se ve como una falla monofásica en la fase B Figura 70.

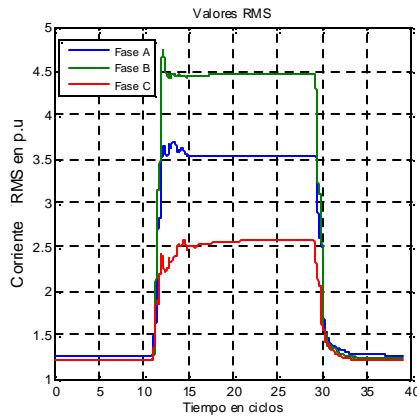
Figura 70. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$ f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.



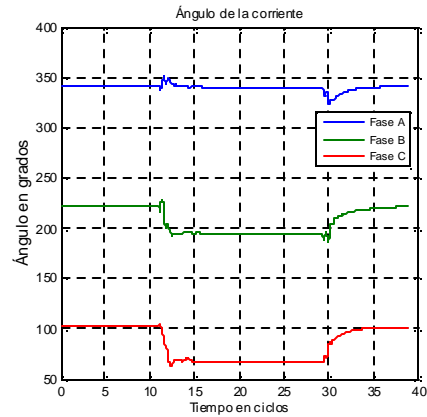
a)



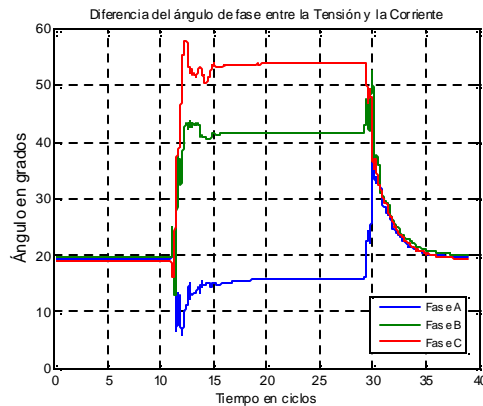
b)



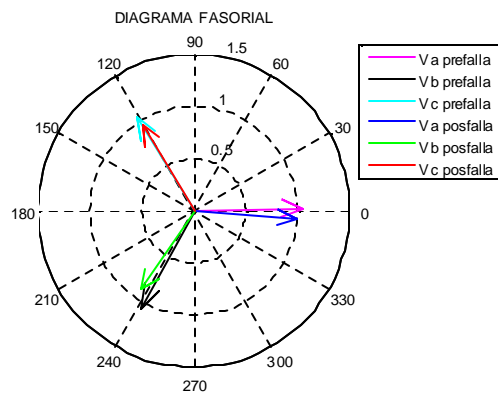
c)



d)



e)



f)

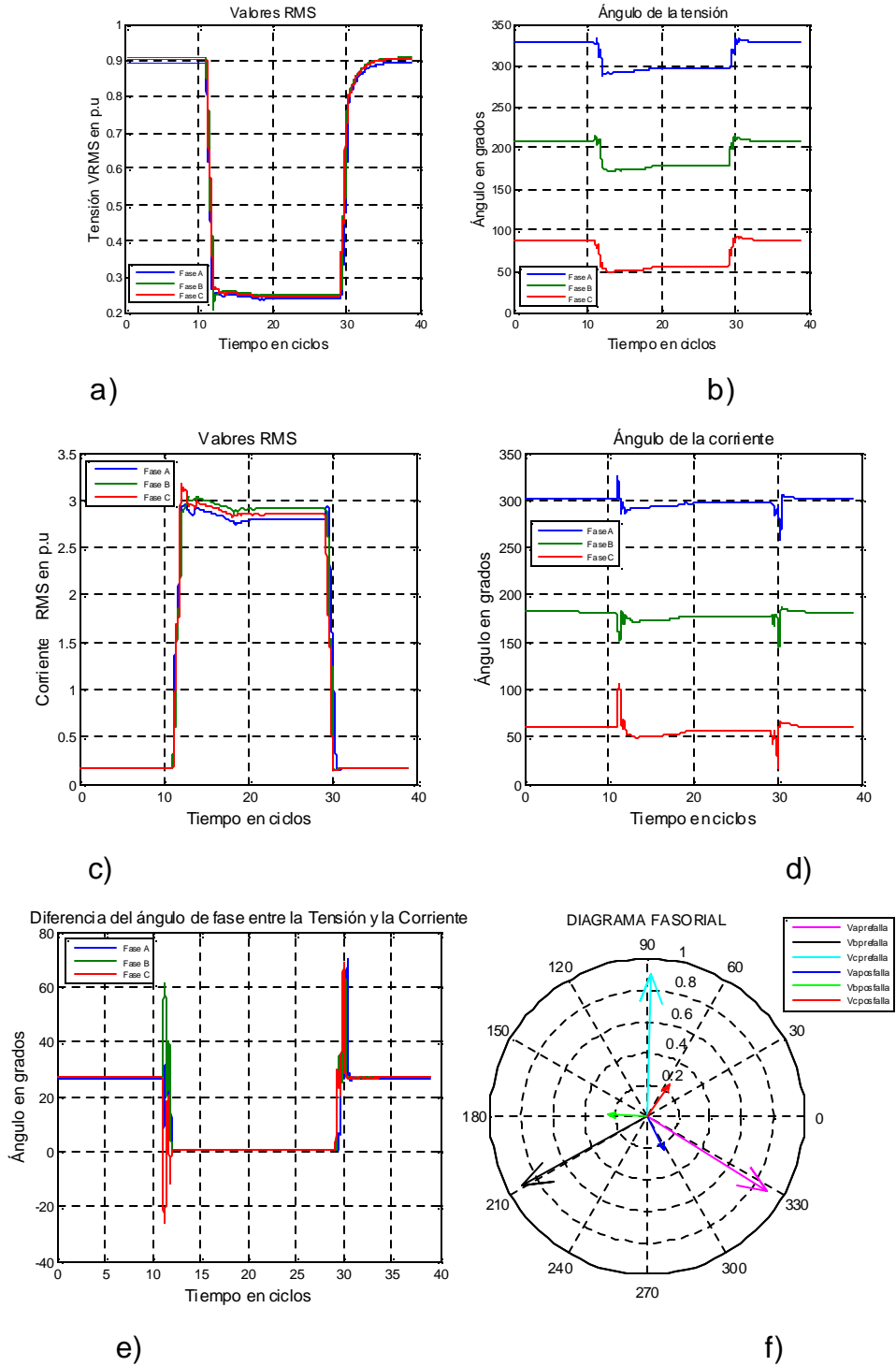
4.4.4 Falla trifásica nodo 862

Se realiza una falla trifásica con una resistencia de falla de 1Ω en el nodo 862, lado de baja del transformador.

En la Figura 71 se presenta una falla equilibrada en la cual las tensiones en las fases presentan una caída del orden del 72% y un salto de ángulo aproximado de 30° para las tres fases. En el diagrama fasorial de tensiones se obtiene un hueco tipo A para este tipo de falla. Se obtiene unas corrientes por la rama de hasta 17 veces el valor de estado estable, con un salto de ángulo del orden del 5° .



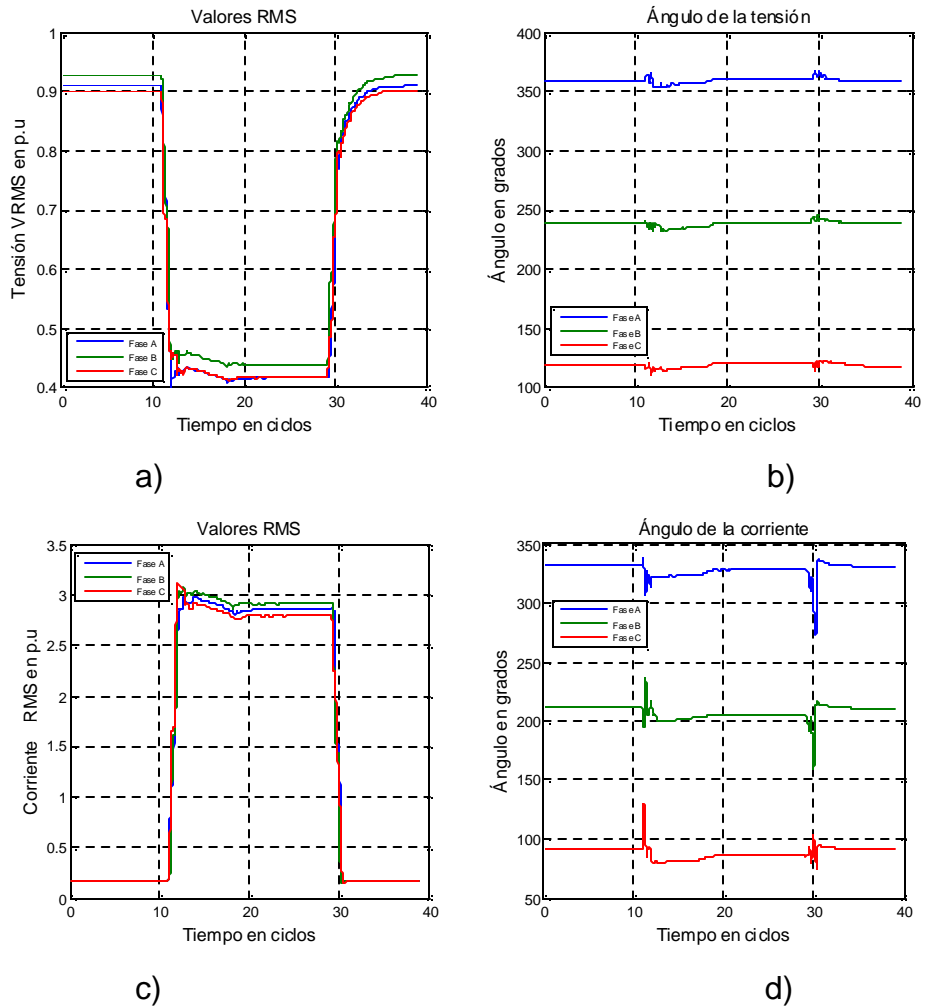
Figura 71. Nodo 862 lado de baja del transformador. a) vrms(t) b) $\theta v(t)$ c) irms(t) d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t)-\theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.

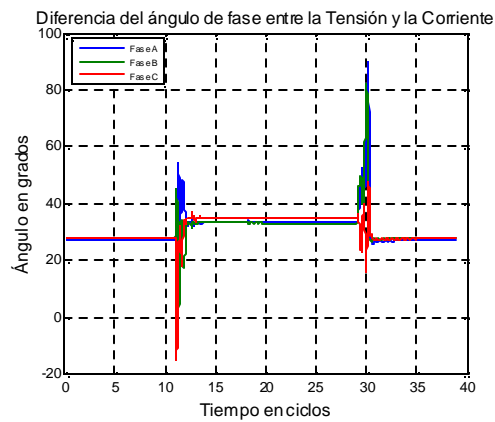




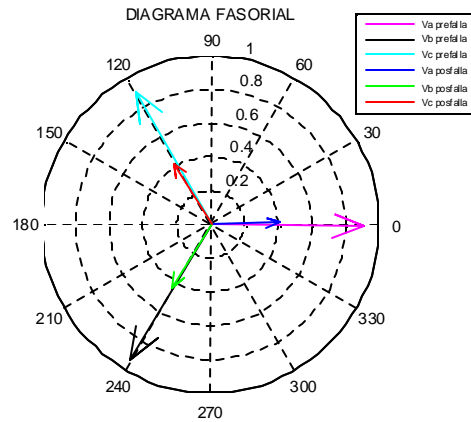
Al pasar el hueco de tensión tipo A por un transformador Dy_1 sigue siendo tipo A debido a que este tipo de falla no presenta componente de secuencia cero. Este hueco de tensión al propagarse por cualquier tipo de transformador conservará su tipo, sin embargo cambiará su magnitud y ángulo de fase a raíz de la impedancia del transformador (Figura 72).

Figura 72. Nodo 836 lado de alta del transformador. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.





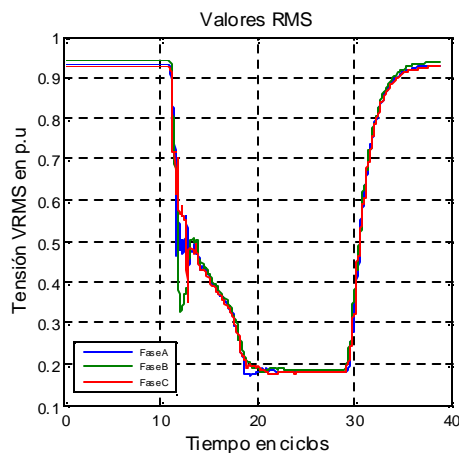
e)



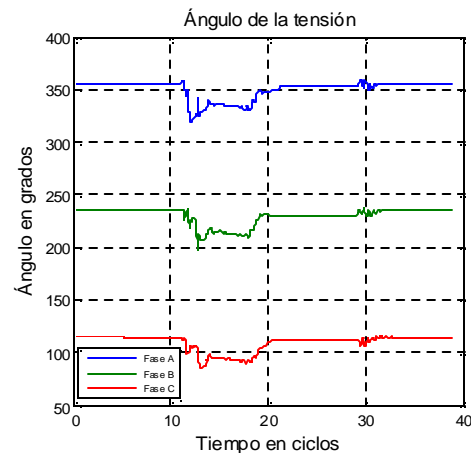
f)

Inmediatamente después del instante de inserción de la falla, la tensión en los terminales del motor decrece lentamente (alrededor de 10 ciclos), luego en el momento que ocurre el despeje de la falla este se comporta de forma similar a un arranque prolongando (alrededor de 7 ciclos de duración aproximadamente). Esto también puede ser visto en el comportamiento de la velocidad del motor, la cual cae lentamente y finalmente retorna a su velocidad de estado estable Figura 73.

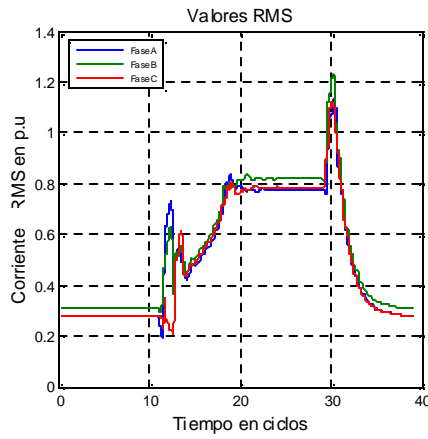
Figura 73. Nodo 890 terminales del motor. a) $v_{rms}(t)$ b) $\theta v(t)$ c) $i_{rms}(t)$ d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor. g) Velocidad del motor.



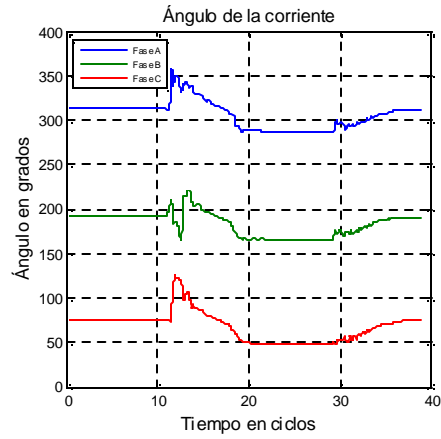
a)



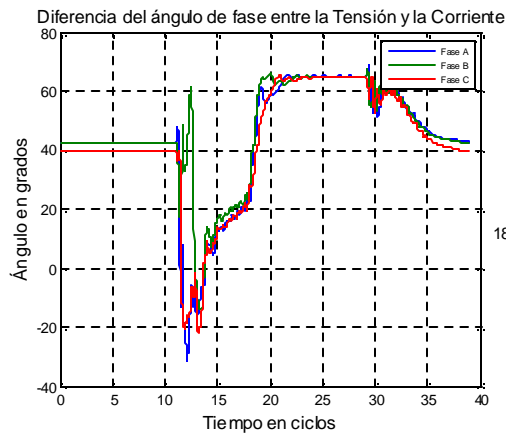
b)



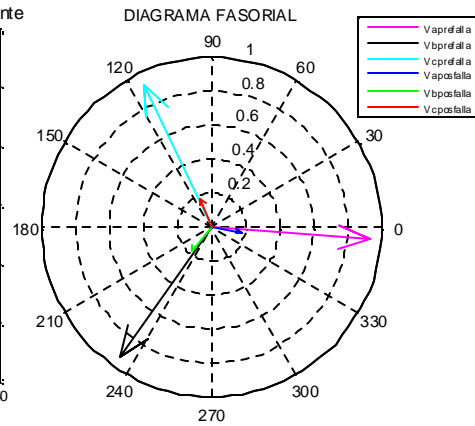
c)



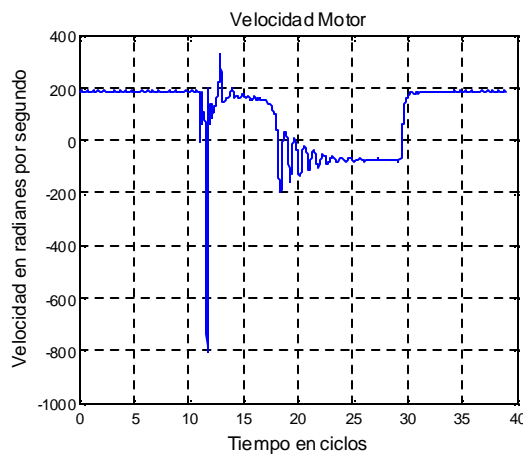
d)



e)



f)

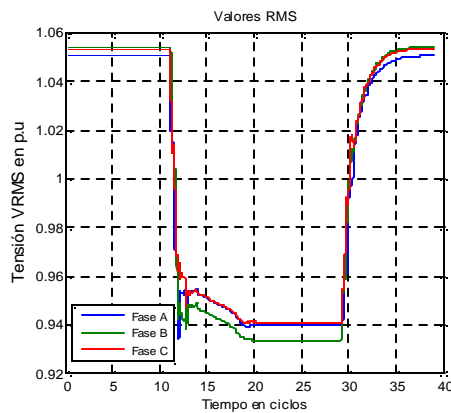


g)

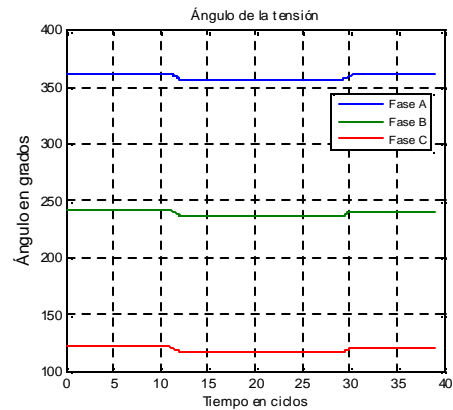


El hueco de tensión trifásico en el nodo 862 (tipo A) llega a la cabecera de la subestación (Nodo 800) como un hueco de tensión tipo A con una tensión en las fases A, B y C de aproximadamente 0.94. En este punto la diferencia de tensión es menor al 10% por tanto ya no se considera como hueco de tensión.

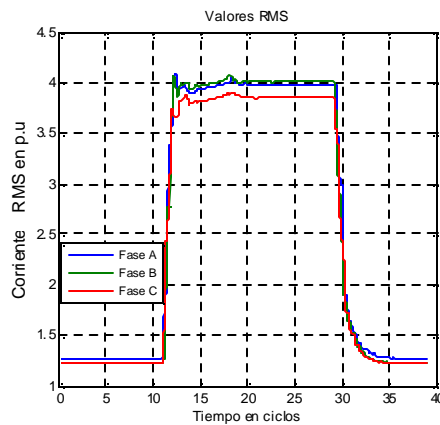
Figura 74. Nodo 800 cabecera de la subestación. a) vrms(t) b) $\theta v(t)$ c) irms(t) d) $\theta i(t)$ e) $\theta v(t) - \theta i(t)$. f) Diagrama fasorial de tensiones pre-falla, post-falla. g) Velocidad del motor.



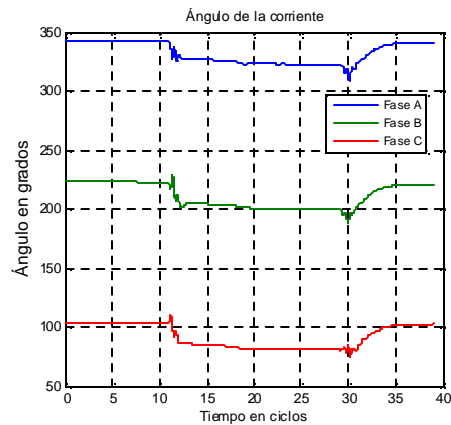
a)



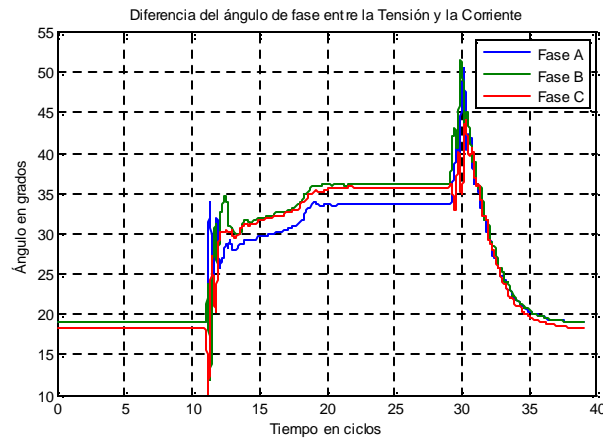
b)



c)



d)



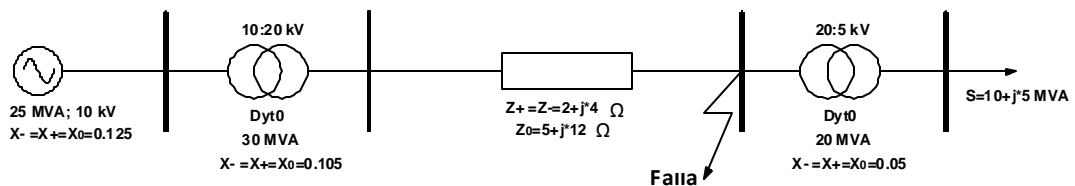
e)

4.4.5 Influencia de la impedancia de falla a tierra (Z_f)

Esta impedancia es otro factor determinante en la magnitud del hueco, su presencia durante el hueco de tensión puede cambiar la tipología del hueco. Ella se debe, fundamentalmente, a la resistencia de los apoyos de las torres de las líneas de AT y MT y a la puesta a tierra de los mismos, por eso puede variar dependiendo de la torre por la que la falla va a tierra, también depende de las condiciones del suelo y muchos otros factores [19].

Para el análisis de la influencia de la impedancia de falla Z_f y Z_{ff} , se simulará el circuito de la Figura 75, tomado de [28], implementando el programa computacional MATLAB, para obtener las tensiones en el lugar de la falla.

Figura 75. Diagrama unifilar del circuito analizado



En el lugar de la falla del circuito en la Figura 75 se realizó falla monofásica y se tomo el registro de las magnitudes y ángulos de fase, en función de la magnitud y distintas condiciones de la impedancia de falla, los resultados se muestran en la



Figura 76 a la Figura 78. En las figuras se observa claramente que las magnitudes y ángulos de las fases cambian cuando varía esta impedancia, por tanto, esta impedancia es una de las principales causas que muchos huecos, cuyas fases deben estar con igual magnitud (fases B-C), no lo estén. En todos los gráficos se observa también que la magnitud de las fases cambia dependiendo del tipo de impedancia de falla si es puramente reactiva, resistiva o combinada.

Figura 76. Falla monofásica a través de una impedancia Z_f puramente resistiva, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.

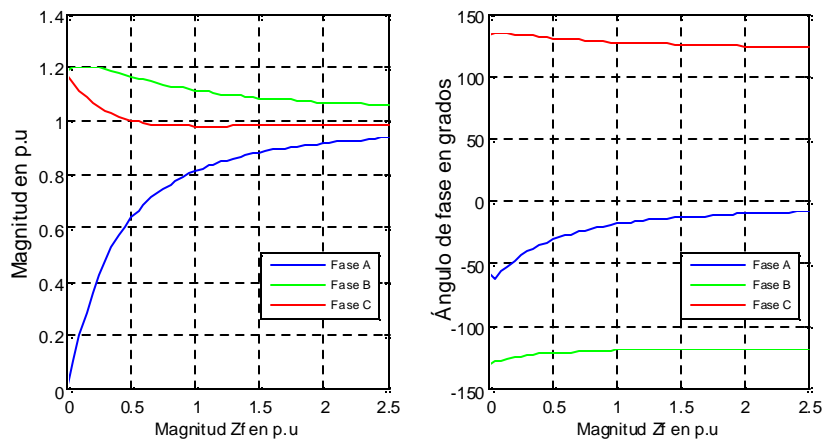


Figura 77. Falla monofásica a través de un impedancia Z_f puramente reactiva, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.

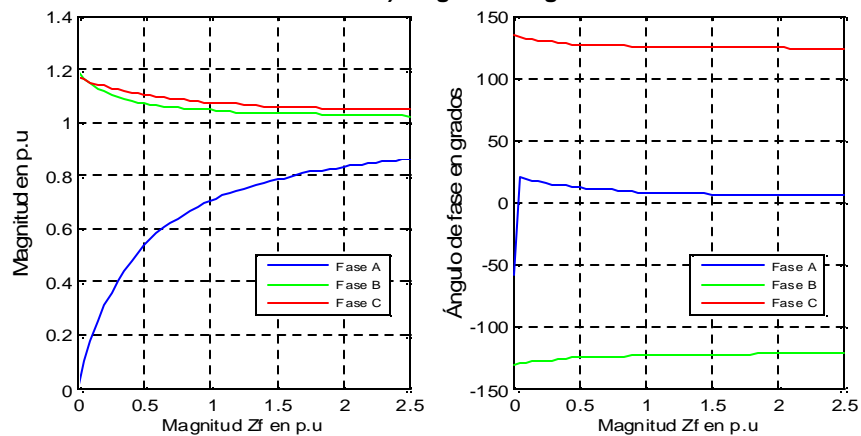
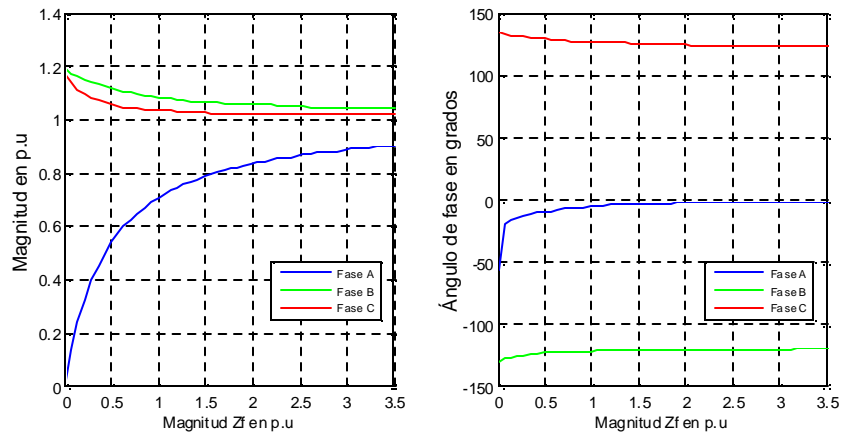




Figura 78. Falla monofásica a través de un impedancia Z_f con parte resistiva y reactiva de igual magnitud, en la fase A. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulos de fase.



Para ver el efecto de la impedancia de falla Z_f en el sistema de 34 Nodos, se realizaron fallas monofásicas en el nodo 834, para tres valores de Z_f puramente resistivos ya que este tipo de impedancia de falla es más frecuente.

En la Figura 79 y en la Tabla 10 se observa claramente que la magnitud y ángulo de las fases cambia cuando aumenta la magnitud de esta impedancia (Z_f) acercándose a sus valores de pre-falla.



Figura 79. Magnitud y fase para falla monofásica fase A Nodo 834 para tres valores de Z_f . a) $Z_f=1 \Omega$ b) $Z_f=20 \Omega$ c) $Z_f=60 \Omega$.

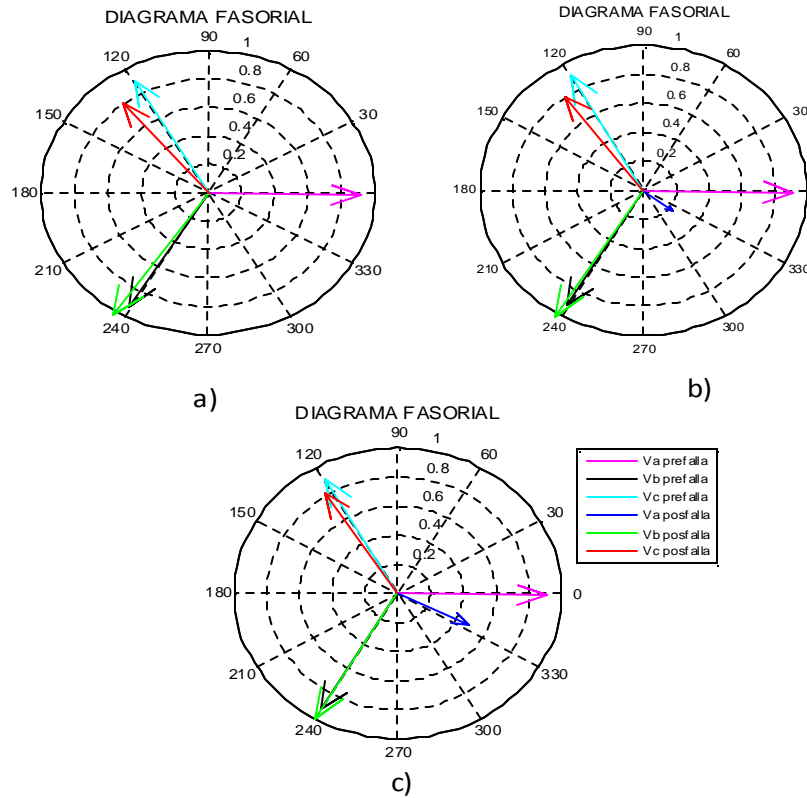


Tabla 10. Magnitud y ángulo de fase para falla monofásica fase A, Nodo 834 para tres valores de Z_f .

Magnitud Pre-falla	$Z_f=1 \Omega$		$Z_f=20 \Omega$		$Z_f=60 \Omega$	
	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud
(A) 0.912	0.013	0.90	0.228	0.7	0.479	0.43
(B) 0.928	1.038	-0.11	1.028	-0.1	1.000	-0.07
(C) 0.904	0.807	0.09	0.804	0.1	0.820	0.08
Fase Pre-hueco	Fase Post-hueco	Dif. Fase	Fase Post-hueco	Dif. Fase	Fase Post-hueco	Dif. Fase
(A) -0.740	-49.483	48.74	-38.960	38.22	-26.420	25.68
(B) -120.66	-123.601	2.950	-121.77	1.11	-120.41	-0.249
(C) 119.11	129.181	-10.070	126.31	-7.20	122.86	-3.752



4.4.6 Influencia de la impedancia de falla entre fases (Z_{ff})

Esta impedancia, al igual que Z_f , es factor determinante en la magnitud del hueco, su presencia durante el hueco de tensión puede cambiar la tipología del hueco. Frecuentemente aparecen registros de huecos producidos por cortocircuitos bifásicos, en los que la magnitud de las dos fases falladas presenta una diferencia substancial. La impedancia de la falla a tierra, vista en la sección anterior, es una de las causas para el caso de cortocircuitos a tierra, pero en el caso de fallas bifásicas y bifásicas a tierra, esta diferencia también puede ser debido a que las dos fases hayan sido cortocircuitadas a través de una impedancia. En líneas aéreas son muchos los factores que pueden generar este tipo de situaciones, como: ramas de árboles, animales, objetos, etc. No obstante, se podría intuir que en las zonas rurales es donde más se presentan fallas con este tipo de fenómeno. En líneas subterráneas, el material aislante que queda entre las fases, en el momento del cortocircuito, genera esta resistencia.

En el lugar de la falla del circuito, en la Figura 75, se realizó falla bifásica (fases B-C) y se tomó el registro de las magnitudes y ángulos de las fases, en función de la magnitud y distintas condiciones de la impedancia de falla. Los resultados se muestran en la Figura 80 a la Figura 82. En las figuras se puede apreciar el efecto que produce Z_{ff} sobre las fases falladas. En todos los gráficos mencionados, se nota cómo al variar el valor de Z_{ff} las diferencias de magnitudes entre las fases falladas, cambian considerablemente.



Figura 80. Falla bifásica a través de una impedancia Z_{ff} puramente resistiva, fase B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.

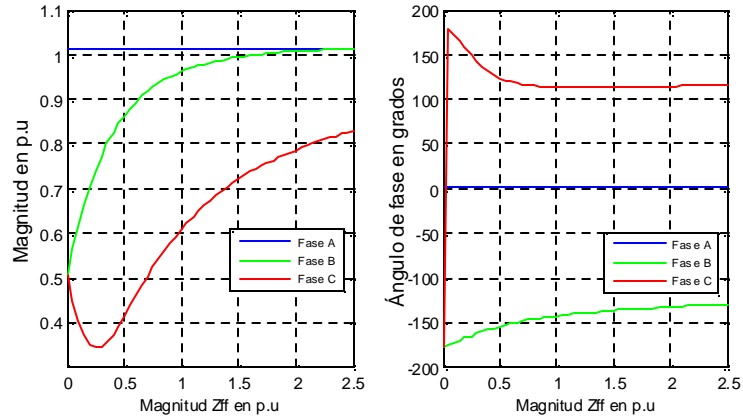


Figura 81. Falla bifásica a través de un impedancia Z_{ff} puramente reactiva, fases B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.

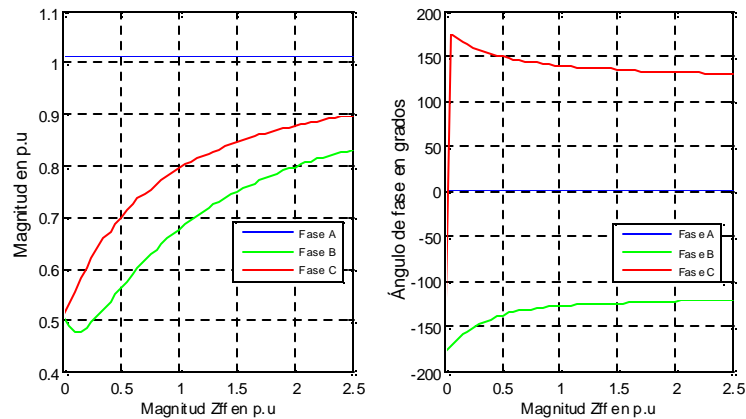
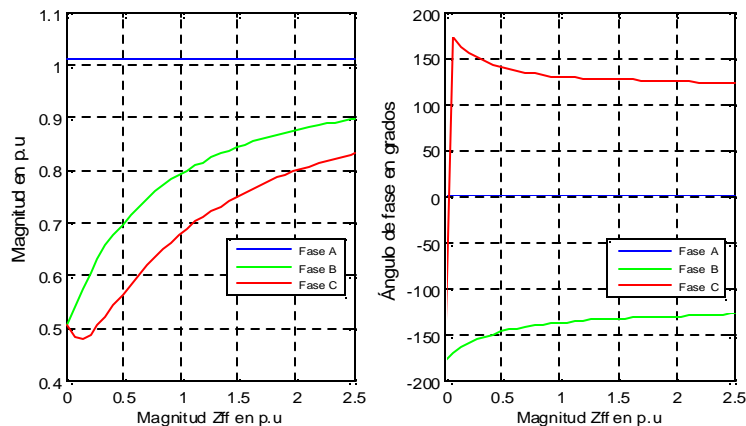


Figura 82. Falla bifásica a través de un impedancia Z_{ff} con parte resistiva y reactiva de igual magnitud, fases B-C. a) Magnitud tensiones de fase b) Magnitud ángulo de fase.





Para ver el efecto de la impedancia de falla Z_{ff} en el sistema de 34 Nodos, se realizaron fallas bifásicas en el nodo 834, para tres valores de Z_{ff} puramente resistivos ya que este tipo de impedancia de falla es más frecuente.

En la Figura 83 y en la Tabla 11 se puede apreciar el efecto que produce Z_{ff} sobre las fases y en especial, sobre las fases falladas.

Figura 83. Magnitud y fase para falla bifásica fases B-C Nodo 834 para tres valores de falla Z_{ff} . a) $Z_{ff}=1$ [Ω] b) $Z_{ff}=20$ [Ω] c) $Z_{ff}=60$ [Ω].

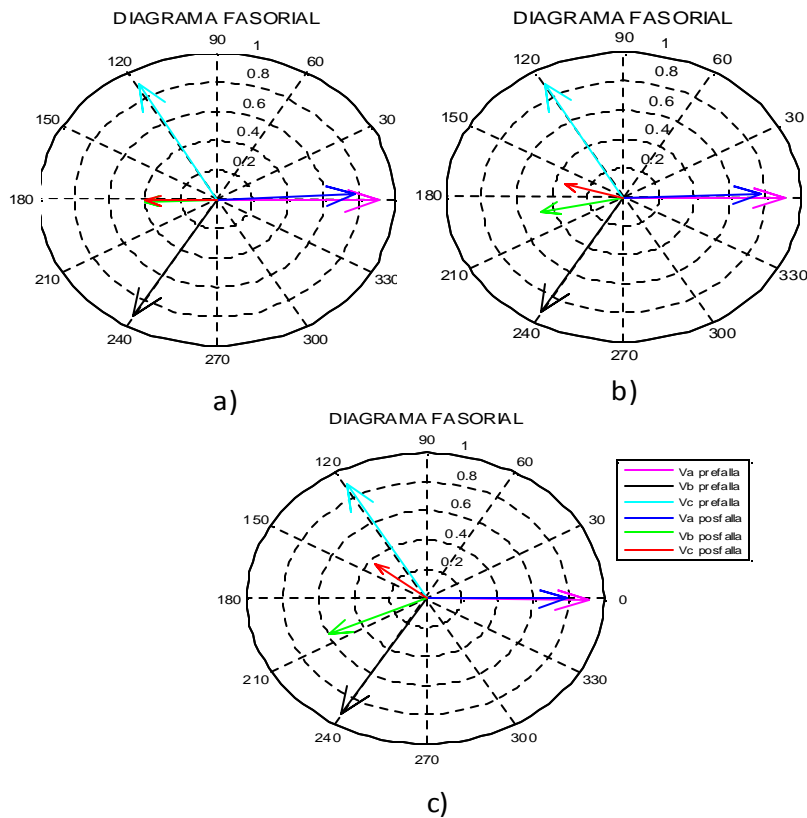




Tabla 11. Magnitud y fase para falla bifásica fase B-C Nodo 834 para tres valores de Rf. Continua...

Magnitud Pre-falla	Zff=1 Ω		Zff=20 Ω		Rf=60 Ω	
	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud	Magnitud Post-Falla	Diferencia Magnitud
(A) 0.912	0.772	0.14	0.758	0.154	0.800	0.112
(B) 0.928	0.402	0.52	0.468	0.460	0.588	0.340
(C) 0.904	0.400	0.504	0.335	0.569	0.365	0.539
Fase Pre-hueco	Fase Post-hueco	Dif. Fase	Fase Post-hueco	Dif. Fase	Fase Post-hueco	Dif. Fase
(A) -0.7340	2.22	2.86	4.59	-5.24	-0.2200	-0.430
(B) -120.66	-120.57	-0.10	-164.8	44.22	-155.98	35.40
(C) 119.11	119.20	-0.10	168.80	-49.59	139.48	-20.27

Las impedancias de falla Z_f y Z_{ff} son un factor importante en la magnitud del hueco de tensión, siendo más profundo el hueco cuanto menor sea la magnitud de estas impedancias y viceversa. Esto se debe, a que al aumentar esta impedancia, la corriente de la falla disminuye, de esta manera, la magnitud del hueco se hace menos severa. También se puede observar de los gráficos de estas secciones, que con el aumento de la magnitud de las impedancias Z_f y Z_{ff} , las magnitudes de las fases que deberían tener igual magnitud se alejan, lo cual es debido a que cada una de ella depende de manera diferente de estas impedancias de falla. Se puede observar también que los ángulos de fase de las tensiones se alejan más de su valor pre-falla cuando menor es la magnitud de estas impedancias de falla. En consecuencia tanto la presencia de Z_f o Z_{ff} pueden cambiar la tipología del hueco.



5. CONCLUSIONES

- Se realizó una recopilación bibliográfica de las formas de las ondas de tensión y corriente asociadas a cada una de las causas de huecos de tensión. Se realizó un análisis de propagación de eventos de tensión utilizando el sistema de distribución de 34 nodos de la IEEE, ATP-EMTP.
- Se generó una base de datos con registros de huecos de tensión originados por distintos tipos de causa con el fin de validar, evaluar y analizar estudios futuros relacionados a los huecos de tensión.
- Del estudio realizado, se puede decir que los huecos de tensión son perturbaciones de carácter transitorio cuyas características dependen, fundamentalmente, de la causa que lo genera, de los elementos de la red por donde se propagan y del lugar donde se registran.
- Se establecieron varios parámetros de comparación para el análisis de propagación de los eventos de tensión, tales como: distancia de la causa al punto de medida, nivel de cortocircuito donde se ha medido, la sección transversal de las líneas y cables, el lugar donde ha ocurrido la causa, si es producido por cortocircuito de la resistencia de falla a tierra y la resistencia entre fases dependiendo del tipo de cortocircuito.
- Se analizó y comprobó que la magnitud del hueco de tensión incrementa (el hueco se hace menos severo) cuando la distancia y el nivel de falla aumenta.
- Se comprobó que la distancia (entre el punto de medida y punto de ubicación de la fuente del evento) y el nivel de cortocircuito en el punto de medida es determinante a la hora de calcular la magnitud del hueco de tensión. Se puede notar que la magnitud del hueco, es este más profundo cuanto más cerca esté la falla del punto de medida y menor sea el nivel de cortocircuito.



- Cuanto mayor sea la sección transversal de la línea entre el punto de medida y el punto de falla, más pequeña es la impedancia del alimentador y por lo tanto es más severo el hueco de tensión.
- La resistencia de falla a tierra también juega un papel importante en la magnitud del hueco de tensión, cuanto más profundo el hueco menor será esta resistencia y viceversa.
- Con el aumento de esta resistencia de falla, las magnitudes de las fases que deberían tener igual magnitud se alejan, demostrando que cada una de ellas depende de manera diferente de esta resistencia, y al variarla también lo hacen las magnitudes de estas fases, pero de manera desigual. Asimismo la resistencia de falla entre fases también es un factor determinante en la diferencia de magnitud entre las fases (que deberían ser de igual magnitud) de los huecos de tensión, siendo mayor esta diferencia con el incremento de esta resistencia.
- Si el lugar de la red donde ocurre el hueco de tensión es en el lado de baja tensión rara vez ocasiona una caída de tensión significativa en la red de media tensión, debido a la elevada impedancia del transformador.
- Se presentó los resultados de los análisis sobre la influencia de las conexiones del transformador en la propagación de huecos de tensión. Se manifiesta claramente que la influencia depende del tipo de transformador utilizado. Esta influencia se pudo observar cuando el hueco de tensión tiene componente de secuencia cero y el transformador no permite el flujo de esta secuencia. Sin embargo cuando el hueco de tensión no presenta componente de secuencia cero, la influencia en este caso es debida a los cambios impuestos por el transformador Tipo 3.



- Aunque la energización de bancos de condensadores no son causa de huecos de tensión, se tuvieron en cuenta y se analizó la propagación de la perturbación generada por este evento. Se presentaron resultados de distintos casos de energización en donde fueron analizados criterios de localización relativa, valores instantáneos y forma de onda.
- La simulación de huecos de tensión, en sistemas de potencia es una herramienta que puede permitir, de manera rápida y barata, tener una idea del comportamiento del sistema frente a huecos de tensión. Sin embargo, hay que contar con los datos reales de operación del sistema suministrado por las compañías de suministro eléctrico.



CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] BOLLEN, Math. H. J. "Understanding Power Quality Problems. Voltage Sag and Interruptions". IEEE PRESS. New York. 2000.
- [2] Ling, P.C.Y. y Basak, A. "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer" IEEE.1988. Págs.3217-3222.
- [3] K. J. Cornick y H. Q. Li. "Power Quality and Voltage Dips".IEEE, Development Department Singapore Power Systems Lt, vol. 1, pp. 149-156. Oct/Nov 2000.
- [4] Zhan., M.H.J. Bollen y L. "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in PowerSystem". IEEE Trans. Power Del.,vol. 15, no. 2, pp. 827-832. Apr. 2000.
- [5] ZHANG, Lidong y BOLLEN, Math H. J. "A Method for Characterisation of Three-Phase Unbalanced Dips from Recorded Voltage Waveshapes".IEEE.Telecommunications Energy Conference, Chalmers of Electric of Technology. 1999.
- [6] J M. T. Aung, J. V. Milanovic. "The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation off Voltage Sags", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 262-269,. January 2006.
- [7] G. Yalginkaya, M.H.J. Bollen, P.A. Crossley. "Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vo1.34, no.4, July 1998, pp.682-688.
- [8] Castellanos C, Carolina y Carrillo F. Luz. "Caracterización de Huecos de Tensión", Tesis de Pregrado de Ingeniería Eléctrica, Dir. Gabriel Ordoñez,Universidad Industrial de Santander. 2003.
- [9] IEEE. "Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic procee equipment", IEEE Std. 1346. 1998.



- [10] Jacinto, Martinez V. Juan y Martin A. "Aplicación del paquete ATP en el análisis de huecos de tensión" Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Catalunya.
- [11] Gabriel, Ordoñez P. "Perturbaciones en la onda de tensión: huecos de tensión y sobretensiones" programa ALURE- Proyecto CREG Cartagena de Indias, Colombia. Febrero 2002. Consultado en Enero de 2010.
- [12] Radial Test Feeders - IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>. Consultado en Enero de 2010
- [13] K. Hur, S. Santoso. "On Two Fundamental Signatures for Determining the Relative Location of Switched Capacitor Banks". IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 2, pp. 1105-1112,. Apr. 2008.
- [14] Profesor Ismael Retana Robleto, M.Sc. Estudiante Ismael López Jiménez. Análisis del comportamiento de bancos de condensadores en subestaciones Universidad de Costa Rica sistema de estudio de posgrado escuela de ingeniería eléctrica. Noviembre de 1998.
- [15] Cláudio José dos Santos Denis V. Coury Maria Cristina.Tavares Mário Oleskovicz. An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System. Dept. of Electrical Engineering Esc. Engenharia de São Carlos University of São Paulo São Carlos (SP) Brazil.
- [16] A. A. Girgis, C. M. Fallon, J. C. P. Rubino, R. C. Catoe. " Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 6, November/December 1993, pp. 1184-1188.



- [17] R. A. Jones, H. S. Fortson Jr. "Consideration of Phase-to-Phase Surge in the Application of Capacitor Banks", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD-1, no 3, July 1993, pp. 240-244.
- [18] T. A. Bellei, R. P. O'Leary, E. H. Camm. "Evaluating Capacitor-Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives Due to Voltage Magnification", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 11, no. 3, July 1996, pp. 1373-1378.
- [19] García Quintero Edwin. "Valoración de la Calidad de la Energía Eléctrica Respecto a huecos de Tensión: Índices y niveles de Calidad". Proyecto de grado de ingeniería dirigido por el Dr. Fuster Roig Vicente. Universidad Politecnica de Valencia.
- [20] Grainger, John J. y Stevenson, William D. "Análisis de Sistemas de Potencia". Cuarta Edicion, Editorial Mc Graw Hill, 2002, pp 358.
- [21] Jiménez, R. Esteban. "Fenómenos Transitorios Asociados a la Energización de un Transformador" Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín.
- [22] Guru, B., Huseying R. "Maquinas eléctricas y transformadores". tercera edición. 2003.
- [23] Blanco S, Jairo y Jagua G, Jorge L. "Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión: análisis de fallas". Proyecto de grado de ingeniería dirigido por Liliana Patricia Jaimes Rojas. Universidad Industrial de Santander 2009.
- [24] Villar Ronald, James Félix. "Caracterización de circuitos de distribución para estudios de calidad en sistemas de energía eléctrica" Proyecto de grado de ingeniería dirigido por Gabriel Ordoñez Plata, Víctor A. Barrera Núñez. Universidad Industrial de Santander . 2003.



- [25] K. Kim, J. Park, J. Lee, S. Ahn y S. Moon. "A Method to Determine the Relative Location of Voltage Sag Source for PQ Diagnosis". IEEE.Seoul National University, Korea. Págs. 2192-2197.
- [26] Seon-Ju Ahn, Dong-Jun Won, D-Yop Chung y Seung-U Moon. "Determination of the Relative Location of Voltage Sag Source According to Event Cause".IEEE, Power Engineering Society G.M, vol.1, pp. 620-625. June 2004.
- [27] P Guasch Luis; L Córcoles Felipe. "Efectos de los huecos de tensión en las maquinas de inducción y en los transformadores trifásicos" Tesis doctoral. Universidad de Catalunya departamento de ingeniería eléctrica, Barcelona. Enero de 2006.
- [28] C. Carrillo, Gilberto. "Sistemas de Potencia". En: Colombia 1984. Ed. Universidad Industrial de Santander ISBN: v. pags, 1.



BIBLIOGRAFÍA

AUNG, J. M. T. and MILANOVIC, J. V. The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags. En: IEEE Transactions on Power Delivery. January 2006., vol. 21, no. 1, pp. 262-269

BELLEI, T.A., O'LEARY, R.P. and CAMM, E.H. Evaluating Capacitor-Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives Due to Voltage Magnification. En: IEEE Trans. On Power Delivery . July 1996, vol. 11, no. 3, pp. 1373-1378.

HUR, K. and SANTOSO, S. On Two Fundamental Signatures for Determining the Relative Location of Switched Capacitor Banks. En: IEEE Trans. On Power Delivery. April 2008, vol. 23 no 2, pp. 1105-1112.

BOLLEN, MATH. H.J. Power Quality Problems. Voltage Sag and Interruptions. New York, 2000.

YALGINKAYA, G., BOLLEN, M. H. J. and CROSSLEY, P.A. Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems En: IEEE Transactions on Industry Applications. July 1998, Vol.34, no. 4.

GRAINGER J, JOHN. y STEVENSON D, WILLIAM. Análisis de Sistemas de Potencia Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill, 2002, pp 358.

GUASCH P, LUIS. Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y en los transformadores trifásicos. Tesis doctoral. Universidad de Catalunya departamento de ingeniería eléctrica, Barcelona. Enero de 2006



ANEXOS

A. ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

En este apartado se presenta un análisis matemático de los diferentes tipos de falla que se presentan en los sistemas de potencia. Para el estudio se utiliza el divisor de tensión que se presenta en la Figura 5.

A.1 Falla Trifásica

En la Figura A.1 se representa el sistema trifásico cuando se produce una falla trifásica en el punto f. Para este tipo de falla se cumple que:

$$U_{a'b'} = U_{b'c'} = U_{c'a'} = 0 \Rightarrow U_{a'} = U_{b'} = U_{c'}$$

$$I_{a'} + I_{b'} + I_{c'} = 0$$
(1)

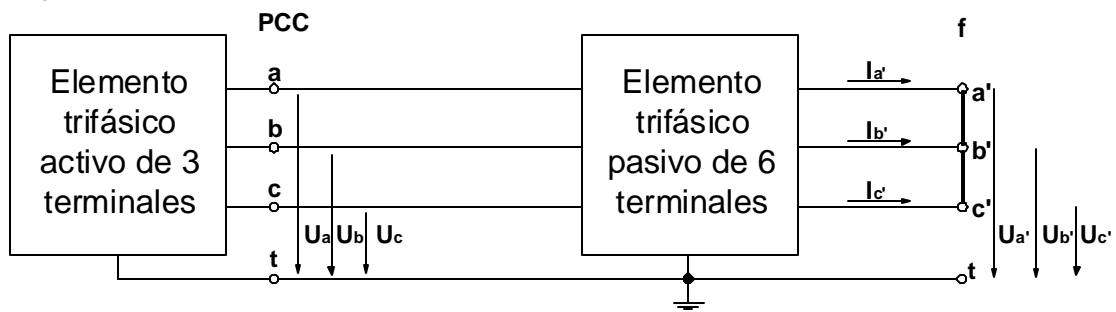
El valor de la tensión en el punto f, en componentes simétricas es:

$$U_0 = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + U_{b'} + U_{c'}) = U_{a'}$$

$$U_1 = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a \times U_{a'} + a^2 \times U_{a'}) = 0$$

$$U_2 = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a^2 \times U_{a'} + a \times U_{a'}) = 0$$
(2)

Figura A. 1 Esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla trifásica en el punto f



La intensidad en componentes simétricas es:



$$\begin{aligned}
 I_{0'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + I_{b'} + I_{c'}) = 0 \\
 I_{1'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a \times I_{b'} + a^2 \times I_{c'}) \\
 I_{2'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a^2 \times I_{b'} + a \times I_{c'})
 \end{aligned} \tag{3}$$

Por lo tanto, este tipo de falla impone las condiciones:

$$U_{1'} = 0 ; U_{2'} = 0 ; I_{0'} = 0 \tag{4}$$

Las cuales se han impuesto en los circuitos de la figura A.2 Resolviendo estos circuitos se obtiene la tensión en el punto PCC.

Se observa que las tensiones de secuencia cero, directa e inversa en el PCC son las del correspondiente divisor de tensión entre Z_{s1} y Z_{f1} . Al resolver el circuito se obtiene:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= h \times V \\
 U_2 &= 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

Donde h es la magnitud del hueco, entendiéndose por ella la tensión residual que se tiene en el PCC durante el hueco:

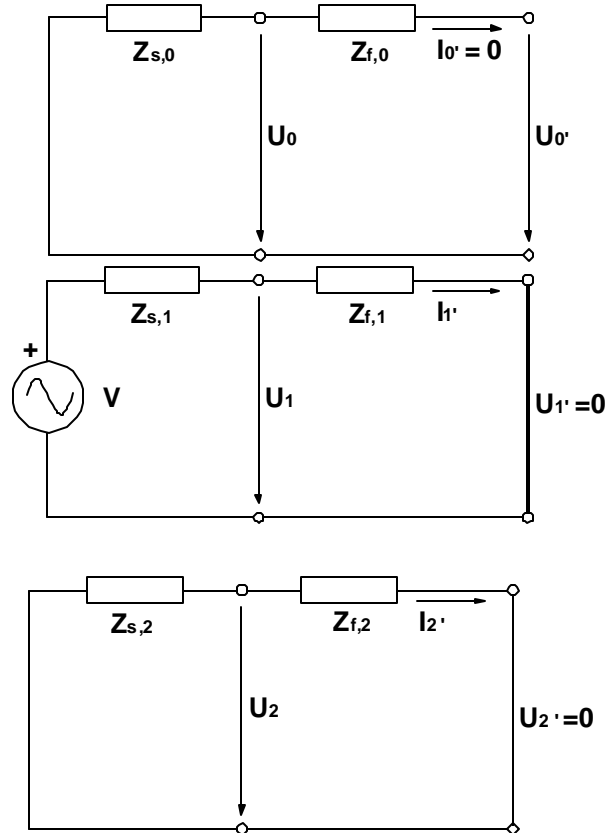
$$h = h \angle \varphi_{sf} = \frac{Z_{f,1}}{Z_{s,1} + Z_{f,1}} = \frac{Z_{f,1} \angle \text{atan} \left(\frac{X_{f,1}}{R_{f,1}} \right)}{|Z_{s,1} + Z_{f,1}| \angle \text{atan} \left(\frac{X_{s,1} + X_{f,1}}{R_{s,1} + R_{f,1}} \right)} \tag{6}$$

Antes del hueco, la componente directa de la tensión, U_1 , tiene el mismo ángulo que V que, a su vez, coincide con el ángulo en la fase a de la alimentación, $V = V_a = V \angle \alpha$. Cuando se produce el hueco, la componente directa de la tensión en



el PCC, U_1 , cambia su ángulo a $\alpha + \phi_{sf}$, y se dice que se ha producido un *salto de fase* en la tensión del PCC:

Figura A. 2 Circuitos equivalentes de secuencia para una falla trifásica



$$\phi_{sf} = \text{atan} \left(\frac{X_{f,1}}{R_{f,1}} \right) - \text{atan} \left(\frac{X_{s,1} + X_{f,1}}{R_{s,1} + R_{f,1}} \right) \quad (7)$$

Si las impedancias $Z_{s,1}$ y $Z_{f,1}$ tienen el mismo ángulo, no se produce salto de fase durante el hueco de tensión ($\phi_{sf} = 0^\circ$). Como $Z_{s,1}$ corresponde a la impedancia equivalente de Thevenin de todos los elementos existentes entre el PCC y el generador, estarán formadas por las impedancias del generador o generadores equivalentes, más las de las líneas y los transformadores. De igual manera, $Z_{f,1}$ representa la impedancia de todos los elementos pasivos entre el PCC y el punto f. Por lo tanto incluirá las impedancias e todas las líneas y transformadores. Si el punto PCC está suficientemente alejado del o de los generadores, como para que



el efecto de la impedancia de los generadores en la impedancia total no sea importante, entonces sólo influirán las impedancias de las líneas y de los transformadores, tanto en Z_{s1} como en Z_{f1} .

Las ecuaciones en variables de fase son mostradas en la ecuación (8), y corresponden a los **Huecos de tipo A**.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} U_a = h \times V \\ U_b = a^2 \times h \times V \\ U_c = a \times h \times V \end{cases} \quad (8)$$

Por tanto, los huecos tipo A son originados por fallas trifásicas, o bien por la conexión de una carga equilibrada de elevada potencia en el punto f.

A.2 Falla trifásica a tierra

En la Figura A.3 se representa el esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla trifásica a tierra en el punto f. Para este tipo de falla se cumple:

$$\left. \begin{array}{l} U_{a'b'} = U_{b'c'} = U_{c'a'} \\ U_{c'} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow U_{a'} = U_{b'} = U_{c'} = 0 \quad (9)$$

La tensión en el punto f, en componentes simétricas, es:

$$\left. \begin{array}{l} U_{0'} = (U_{a'} + U_{b'} + U_{c'})/3 = 0 \\ U_{1'} = (U_{a'} + a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'})/3 = (U_{a'} + a \times U_{a'} + a^2 \times U_{a'})/3 = 0 \\ U_{2'} = (U_{a'} + a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'})/3 = (U_{a'} + a^2 \times U_{a'} + a \times U_{a'})/3 = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

Por lo tanto, este tipo de falla impone las condiciones:

$$U_{0'} = 0 \quad ; \quad U_{1'} = 0 \quad ; \quad U_{2'} = 0 \quad (11)$$



Las cuales se han impuesto en los circuitos de la Figura A.3. Resolviendo estos se obtiene la tensión en el PCC:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= h \times V \\
 U_2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Figura A. 3 Esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla trifásica a tierra en el punto f.

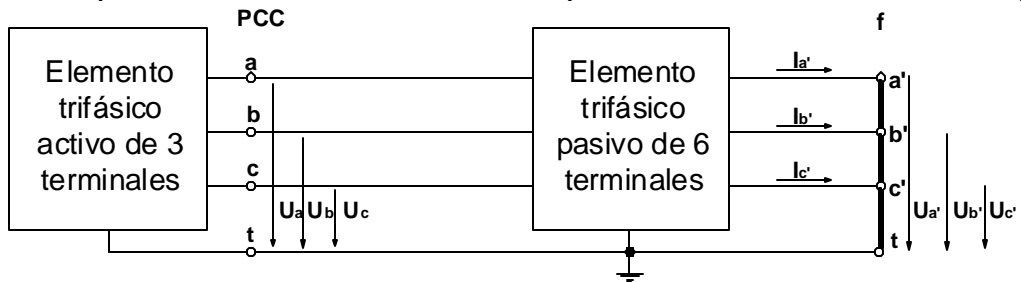
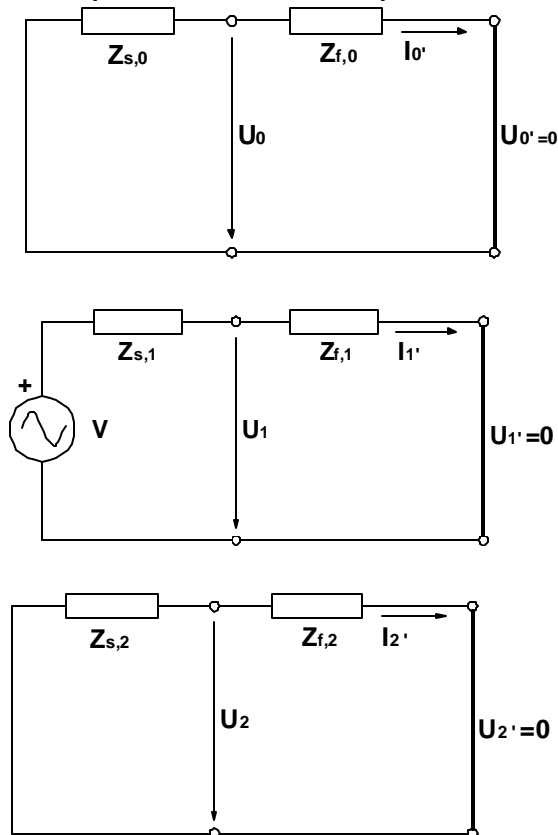


Figura A. 4 Circuitos equivalentes de secuencia para una falla trifásica a tierra.





Las ecuaciones (12) para la falla trifásica a tierra coinciden con las obtenidas para la falla trifásica en (5). Por lo tanto, el valor de la magnitud \underline{h} , y el del salto de fase, ϕ_{sf} , son los definidos en las ecuaciones (6) y (7) respectivamente. Al coincidir las ecuaciones de secuencia de la falla trifásica a tierra con las de la falla trifásica, también coinciden las ecuaciones en variables de fase mostradas en (8), que tal como se comentó en el apartado anterior corresponden a los **Huecos tipo A**.

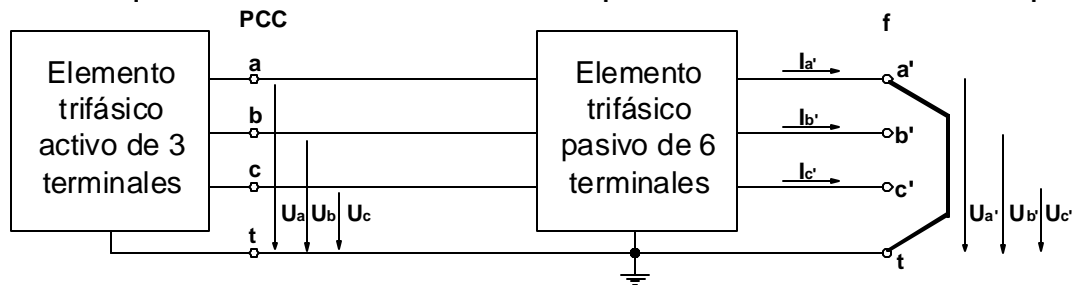
A.3 Falla fase- tierra

En el sistema de la Figura A.5 se ha producido una falla entre la fase a y tierra en el punto f. Para este tipo de falla se cumple que:

$$U_{a'} = 0 \quad ; \quad I_{b'} = I_{c'} = 0 \quad (13)$$

La tensión en el punto f, en componentes simétricas, es:

Figura A. 5 Esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla fase a – tierra en el punto f



$$\left. \begin{aligned} U_{0'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + U_{b'} + U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{b'} + U_{c'}) \\ U_{1'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'}) \\ U_{2'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'}) \end{aligned} \right\} (14)$$

$$U_{0'} + U_{1'} + U_{2'} = 0$$

El valor de las intensidades en componentes simétricas es:



$$\left. \begin{aligned} I_{0'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + I_{b'} + I_{c'}) = \frac{1}{3} \times I_{a'} \\ I_{1'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a \times I_{b'} + a^2 \times I_{c'}) = \frac{1}{3} \times I_{a'} \\ I_{2'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a^2 \times I_{b'} + a \times I_{c'}) = \frac{1}{3} \times I_{a'} \end{aligned} \right\} I_{0'} = I_{1'} = I_{2'} \quad (15)$$

Este tipo de falla impone las condiciones:

$$U_0 + U_{1'} + U_{2'} = 0 ; \quad I_{0'} = I_{1'} = I_{2'} = 0 \quad (16)$$

Estas condiciones se han impuesto en los tres circuitos de la Figura A.6, la tensión del PCC suponiendo que $Z_{s,0} = Z_{s,1} = Z_{s,2} = Z_s$ es:

$$\begin{aligned} U_0 &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times V \\ U_{1'} &= \frac{1}{3} \times (2 + h) \times V \\ U_{2'} &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times V \end{aligned} \quad (17)$$

Dónde:

$$h = h \angle \varphi_{sf} = \frac{(Z_{f,0} + Z_{f,1} + Z_{f,2})}{3 \times Z_s + (Z_{f,0} + Z_{f,1} + Z_{f,2})} \quad (18)$$

Si las impedancias $3 \times Z_s$ y $(Z_{f,0} + Z_{f,1} + Z_{f,2})$ presentan el mismo ángulo, no se produciría salto de fase durante el hueco de tensión ($\varphi_{sf} = 0^\circ$).

Las ecuaciones (17) en variables de fase son:

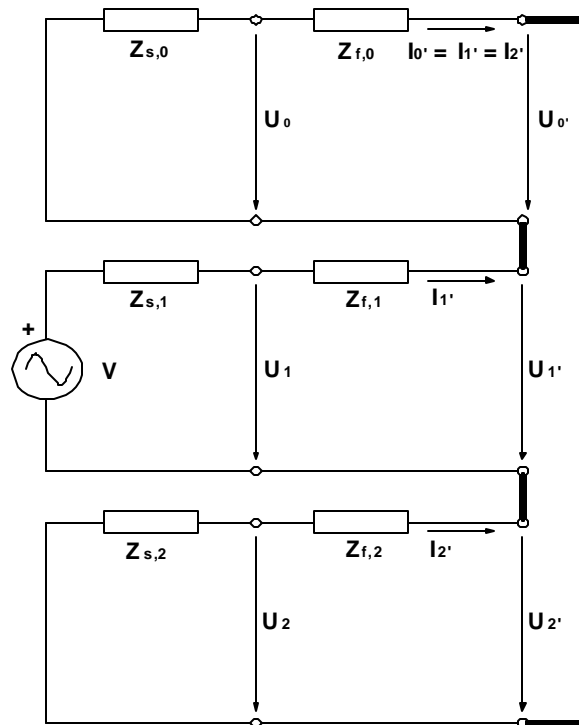
$$\begin{aligned} U_a &= h \times V \\ U_b &= a^2 \times V \\ U_c &= a \times V \end{aligned} \quad (19)$$

Las ecuaciones (19) corresponden a los **huecos tipo B**.

Si la falla se hubiera producido entre la fase b y tierra, la tensión en el PCC en componentes simétricas y en variables en fase sería:



Figura A. 6 Circuitos equivalentes de secuencia para una falla fase a – tierra.



$$\left. \begin{aligned} U_0 &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times a^2 \times V \\ U_1 &= \frac{1}{3} \times (2 + h) \times V \\ U_2 &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times a \times V \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned} U_a &= V \\ U_b &= a^2 \times h \times V \\ U_c &= a \times V \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Análogamente, si la falla se hubiera producido entre la fase c y la tierra:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times a^2 \times V \\ U_1 &= \frac{1}{3} \times (2 + h) \times a \times V \\ U_2 &= -\frac{1}{3} \times (1 - h) \times V \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned} U_a &= V \\ U_b &= a^2 \times V \\ U_c &= a \times h \times V \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

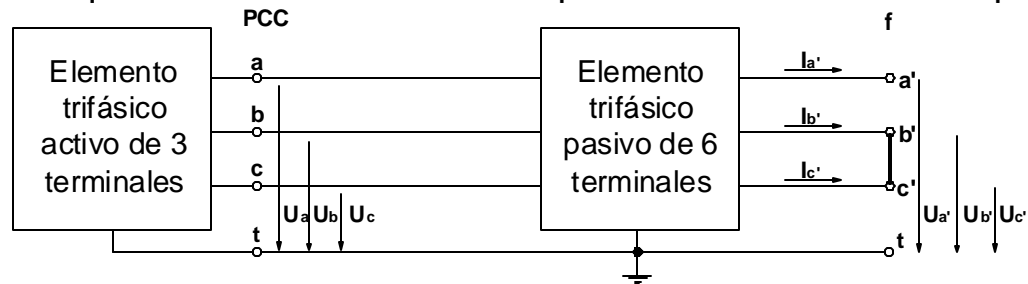


A.4 Falla fase- fase

En la Figura A.7 se representa el esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla fase b-fase c en el punto f, donde se cumple que:

$$U_{b'c'} = 0 \Rightarrow U_{b'} = U_{c'} \quad (22)$$

Figura A.7 Esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla fase b – fase c en el punto f.



$$\left. \begin{aligned} I_{a'} &= 0 \\ I_{b'} &= -I_{c'} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

El valor de la tensión en el punto f, en componentes simétricas es:

$$\left. \begin{aligned} U_{0'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + U_{b'} + U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{a'} + 2 \times U_{b'}) \\ U_{1'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{a'} - U_{b'}) \\ U_{2'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times (U_{a'} - U_{b'}) \end{aligned} \right\} U_{1'} = U_{2'} \quad (24)$$

El valor de las intensidades, en componentes simétricas es:

$$\left. \begin{aligned} I_{0'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + I_{b'} + I_{c'}) = 0 \\ I_{1'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a \times I_{b'} + a^2 \times I_{c'}) = j \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{b'} \\ I_{2'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a^2 \times I_{b'} + a \times I_{c'}) = -j \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{b'} \end{aligned} \right\} I_{1'} = I_{2'} = 0 \quad (25)$$

Por lo tanto, este tipo de falla impone las condiciones:

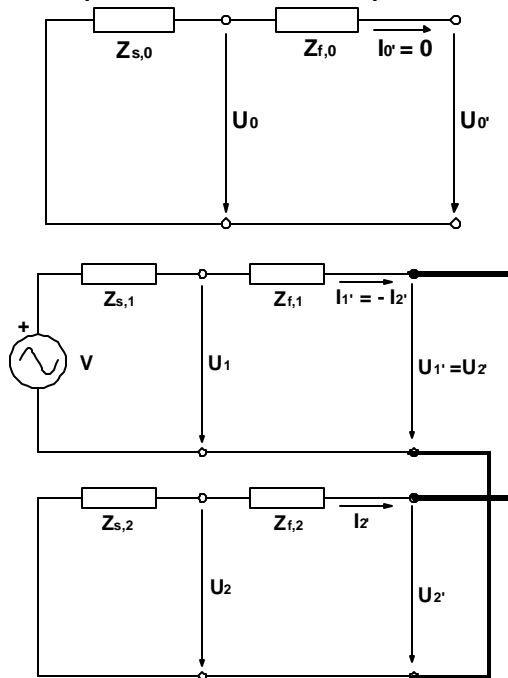
$$U_{1'} = U_{2'} \quad ; \quad I_{0'} = 0 \quad ; \quad I_{1'} + I_{2'} = 0 \quad (26)$$



Imponiendo estas condiciones en los circuitos de la Figura A.8 se deduce la tensión del PCC suponiendo que $Z_{s1} = Z_{s2} = Z_s$.

$$\begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= \frac{1}{2} \times (1 + h) \times V \\
 U_2 &= \frac{1}{2} \times (1 - h) \times V
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Figura A. 8 Circuitos equivalentes de secuencia para una falla fase b – fase c.



$$h = h \angle \varphi_{sf} = \frac{(Z_{f,1} + Z_{f,2})}{2 \times Z_s + (Z_{f,1} + Z_{f,2})}
 \tag{28}$$

Si las impedancias $2 \times Z_s$ y $(Z_{f,1} + Z_{f,2})$ presentan el mismo ángulo no se produciría salto de fase durante el hueco de tensión ($\varphi_{sf} = 0^\circ$). Las ecuaciones (27) en variables de fase son:



$$\begin{aligned}
 U_a &= V \\
 U_b &= \left(-\frac{1}{2} - j \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \right) \times V \\
 U_c &= \left(-\frac{1}{2} + j \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \right) \times V
 \end{aligned} \tag{29}$$

Las ecuaciones (29) corresponden a los **huecos tipo C**. Si la falla se hubiera producido entre las fases c y a, la tensión en el PCC, tanto en componentes simétricas como en notación fasorial, sería:

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= \frac{1}{2} \times (1 + h) \times V \\
 U_2 &= \frac{1}{2} \times (1 - h) \times a \times V
 \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{4} \times [(1 + 3 \times h) + j \times \sqrt{3} \times (1 - h)] \times V \\
 U_b &= a^2 \times V \\
 U_c &= \frac{1}{4} \times [(1 - 3 \times h) + j \times \sqrt{3} \times (1 + h)] \times V
 \end{aligned} \right\} \tag{30}$$

Si la falla se hubiera producido entre las fases a y b la tensión en el punto PCC, tanto en componentes simétricas como notación fasorial, sería:

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= 0 \\
 U_1 &= \frac{1}{2} \times (1 + h) \times V \\
 U_2 &= \frac{1}{2} \times (1 - h) \times a^2 \times V
 \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{4} \times [(1 + 3 \times h) - j \times \sqrt{3} \times (1 - h)] \times V \\
 U_b &= \frac{1}{4} \times [(1 - 3 \times h) - j \times \sqrt{3} \times (1 + h)] \times V \\
 U_c &= a \times V
 \end{aligned} \right\} \tag{31}$$

A.5 Falla fase- fase-tierra

En la Figura A.9 se representa el esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla entre las fases b, c y tierra en el punto f. En esta falla se cumple que:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{b'c'} &= 0 \\
 U_{c'} &= 0
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_{b'} = 0$$

$$I_{a'} = 0 \tag{32}$$



La tensión en el punto f en componentes simétricas es:

$$\left. \begin{aligned} U_{0'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + U_{b'} + U_{c'}) = \frac{1}{3} \times U_{a'} \\ U_{1'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a \times U_{b'} + a^2 \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times U_{a'} \\ U_{2'} &= \frac{1}{3} \times (U_{a'} + a^2 \times U_{b'} + a \times U_{c'}) = \frac{1}{3} \times U_{a'} \end{aligned} \right\} U_{0'} = U_{1'} = U_{2'} \quad (33)$$

El valor de las intensidades en componentes simétricas es:

$$\left. \begin{aligned} I_{0'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + I_{b'} + I_{c'}) = \frac{1}{3} \times (I_{b'} + I_{c'}) \\ I_{1'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a \times I_{b'} + a^2 \times I_{c'}) = \frac{1}{3} (a \times I_{b'} + a^2 \times I_{c'}) \\ I_{2'} &= \frac{1}{3} \times (I_{a'} + a^2 \times I_{b'} + a \times I_{c'}) = \frac{1}{3} (a^2 \times I_{b'} + a \times I_{c'}) \end{aligned} \right\} I_{0'} + I_{1'} + I_{2'} = 0 \quad (34)$$

Figura A. 9 Esquema de un sistema trifásico cuando se produce una falla fase b – fase c tierra en el punto f.

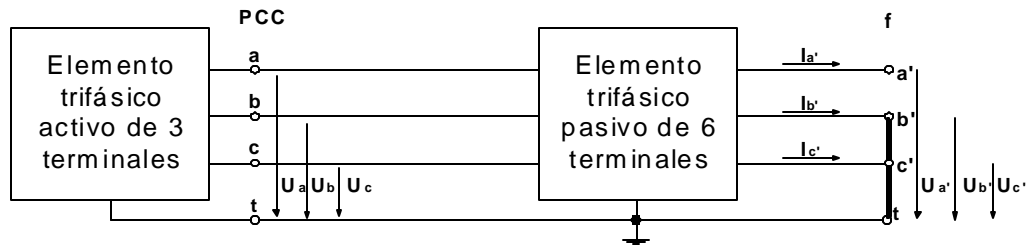
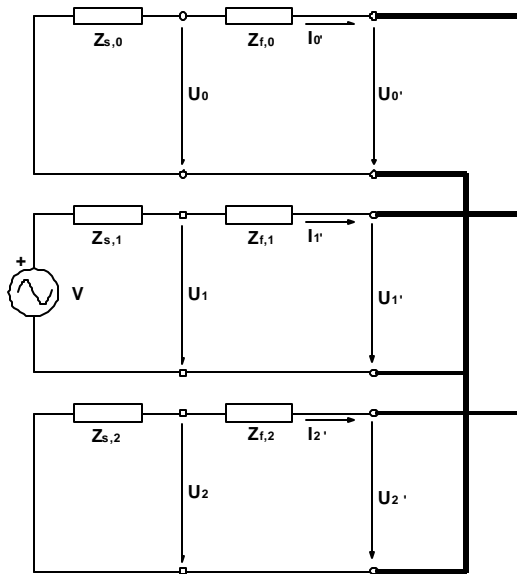




Figura A. 10 Circuitos equivalentes de secuencia para una falla fase b – fase c – tierra.



Este tipo de falla impone las condiciones siguientes:

$$U_{0'} = U_{1'} = U_{2'} \quad ; \quad I_{0'} + I_{1'} + I_{2'} = 0 \quad (35)$$

Imponiendo estas condiciones en los circuitos de la Figura A.10 se calcula la tensión del PCC suponiendo que $Z_{s,0} = Z_{s,1} = Z_{s,2} = Z_s$ y que $Z_{f,0} = Z_{f,1} = Z_{f,2} = Z_f$.

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times V \\ U_1 &= \frac{1}{3} \times (1 + 2 \times h) \times V \\ U_2 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times V \end{aligned} \quad (36)$$

Dónde:

$$h = h \angle \varphi_{sf} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (37)$$

Si las impedancias Z_s y Z_f presentan el mismo ángulo, no se producirá salto de fase durante el hueco de tensión ($\phi_{sf} = 0^\circ$). Las ecuaciones (36) en variables de fase son:



$$\begin{aligned}
 U_a &= V \\
 U_b &= a^2 \times h \times V \\
 U_c &= a \times h \times V
 \end{aligned} \tag{38}$$

Las ecuaciones (38) corresponden a los **huecos tipo E**.

Si la falla hubiera sido fase c – fase a – tierra, la tensión en el punto PCC en componentes simétricos y en variables de la fase habría sido:

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times a \times V \\
 U_1 &= \frac{1}{3} \times (2 + h) \times a^2 \times V \\
 U_2 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times V
 \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{3} \times (1 + 2 \times h) \times a^2 \times V \\
 U_b &= \frac{1}{3} \times (4 - h) \times a \times V \\
 U_c &= \frac{1}{3} \times (1 + 2 \times h) \times V
 \end{aligned} \right\} \tag{39}$$

Si la falla hubiera sido fase a – fase b – tierra, la tensión en el punto PCC en componentes simétricas y en variables de fase hubiera sido:

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times a \times V \\
 U_1 &= \frac{1}{3} \times (2 + h) \times V \\
 U_2 &= \frac{1}{3} \times (1 - h) \times a^2 \times V
 \end{aligned} \right\} ; \left. \begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{3} \times (1 + 2 \times h) \times V \\
 U_b &= \frac{1}{3} \times (1 + 2 \times h) \times a^2 \times V \\
 U_c &= \frac{1}{3} \times (4 - h) \times a \times V
 \end{aligned} \right\} \tag{40}$$

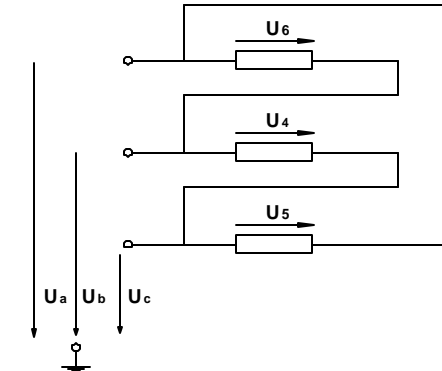
A.6 DETERMINACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN PARA CARGAS CONECTADAS EN TRIÁNGULO

En el apartado anterior se han determinado los huecos de tensión para cargas conectadas en estrella con neutro. En este apartado se determinan los huecos para cargas conectadas físicamente en triángulo, y para cargas conectadas en estrella con neutro aislado (donde habría que obtener el triángulo equivalente).



Supongamos ahora que en el punto de interés se conecta una carga en triángulo. Tomando como referencia el esquema de la Figura A.11, las tensiones de la carga en triángulo U_4 , U_5 , U_6 se pueden obtener a partir de las tensiones entre fase y neutro en el punto de conexión de la carga:

Figura A. 11 Esquema de una carga conectada en triángulo



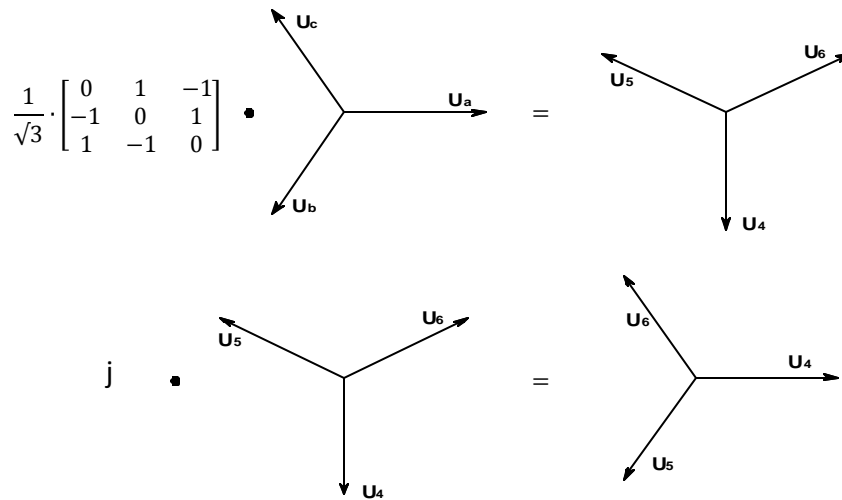
$$\begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (41)$$

Para obtener las tensiones de fase de la carga en triángulo a partir de las tensiones fase-neutro de la red de la que se alimenta basta con multiplicar esta por la matriz \mathbf{T}_3 , definida como:

$$\mathbf{T}_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$



Figura A. 12 Relación entre los fasores de tensión de una carga conectada en triangulo y sus correspondientes tensiones de alimentación fase-neutro.



La constante $1/\sqrt{3}$ en (42) se ha añadido para que los módulos de U_4, U_5, U_6 , sean iguales a los de U_a, U_b, U_c , cuando la alimentación sea simétrica. Debido al desfase de 90° entre el sistema de tensiones U_4, U_5, U_6 y el sistema formado por U_a, U_b, U_c se multiplica por j para adelantarlo y tener la fase a como referencia, tal como se representa en la Figura A.12.

En el caso de trabajar con variables de secuencia, la relación anterior se puede obtener aplicando la transformación de Fortescue a (41), resultando:

$$\begin{bmatrix} U_{0,\Delta} \\ U_{1,\Delta} \\ U_{2,\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Donde se observa que en una carga en triangulo la componente de secuencia cero de las tensiones de fase es nula, lo cual es lógico puesto que la suma de las tensiones de fase es nula.

- **Huecos tipo B, C y E vistos por una carga conectada en triangulo**

A partir de las ecuaciones del hueco que ve una carga conectada en estrella con neutro cuando se produce una falla fase-tierra (hueco tipo B) ecuación (17), se



pueden obtener las ecuaciones de secuencia para una carga en triángulo sometida al mismo tipo de falla:

$$\begin{bmatrix} U_{0,\Delta} \\ U_{1,\Delta} \\ U_{2,\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -(1+h) \\ (2+h) \\ -(1+h) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2+h \\ 1-h \end{bmatrix} \quad (44)$$

Las ecuaciones de fase correspondientes son:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2+h \\ 1-h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \cdot h\right) \cdot j \cdot \sqrt{3} \\ -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \cdot h\right) \cdot j \cdot \sqrt{3} \\ -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \cdot h\right) \cdot j \cdot \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Comparando las ecuaciones obtenidas en (45), con las ecuaciones de un hueco de tensión **Tipo C**, estas se pueden obtener reemplazando h por $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h$. Por tanto cuando una carga conectada en triángulo se ve sometida a una falla fase-tierra. Las ecuaciones obtenidas en (45) se denominan **Tipo C***.

A partir de las ecuaciones del hueco que ve una carga conectada en estrella con neutro cuando se produce una falla fase-fase (hueco tipo C), (27), se pueden obtener las ecuaciones de secuencia para una carga conectada en triángulo sometida al mismo tipo de falla:

$$\begin{bmatrix} U_{0,\Delta} \\ U_{1,\Delta} \\ U_{2,\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ (1+h) \\ (1-h) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+h \\ -(1-h) \end{bmatrix} \quad (46)$$

Las ecuaciones de fase correspondientes son:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+h \\ -(1-h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (47)$$



Las ecuaciones obtenidas en (47) se denominan **Tipo D**. A partir de las ecuaciones del hueco que ve una carga conectada en estrella con neutro cuando se produce una falla fase-fase-tierra (hueco Tipo E) (36), se pueden obtener las ecuaciones de secuencia para una carga conectada en triangulo sometida al mismo tipo de falla:

$$\begin{bmatrix} U_{0,\Delta} \\ U_{1,\Delta} \\ U_{2,\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1-h \\ 1+2 \cdot h \\ 1-h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+2 \cdot h \\ -(1-h) \end{bmatrix} \quad (48)$$

Las ecuaciones de fase correspondientes son:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+2 \cdot h \\ -(1-h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Las ecuaciones obtenidas en (49) se denominan **Tipo F**.

Tabla A. 1 Huecos de tensión en función del tipo de falla y de la conexión de la carga

Tipo de Falla	Tipo de carga	
	Estrella con neutro	Triangulo o estrella sin neutro
3 fases, 3 fases a tierra	Tipo A	Tipo A
1 fase	Tipo B	Tipo C*
2 fases	Tipo C	Tipo D
2 fases a tierra	Tipo E	Tipo F



B. CAUSAS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

B.1 Fallas de Red

Una falla en un circuito es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente y pueden tener su origen en factores como el viento, talas de árboles, descargas atmosféricas, deterioro de los equipos, animales, etc. [20]. Una vez que una línea del sistema eléctrico sufre un cortocircuito, la impedancia vista desde el alimentador decrece durante la perturbación. Como consecuencia, grandes flujos de corriente circulan desde la fuente hacia el punto de falla, provocando caídas de tensión a lo largo del circuito. Debido a que la corriente de cortocircuito tiene un orden mayor que la corriente nominal, podrían causar serios daños en los equipos si la perturbación no se despeja oportunamente. De la misma forma, devanados y barras pueden sufrir daños mecánicos debido a los grandes esfuerzos electromecánicos a los que se ven sometidos durante la falla. Adicionalmente, las cargas ubicadas en las vecindades del punto de falla, podrían verse afectadas si los dispositivos de protección no operan adecuadamente, ya que paralelamente estarían experimentando el hueco de tensión hasta la activación de las protecciones.

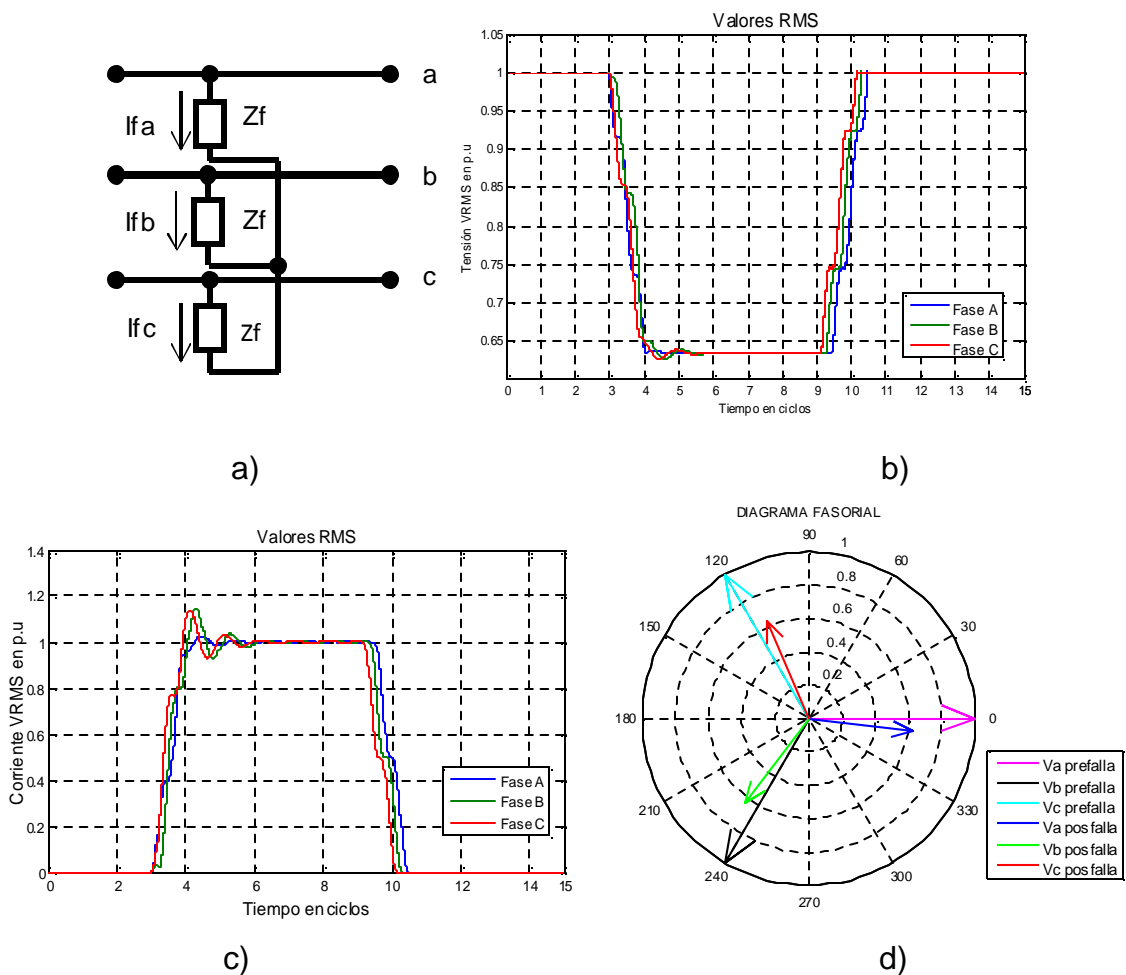
La forma de onda debida a una falla de red puede ser caracterizada por una severa caída de tensión y pendiente pronunciada en comparación con otras causas de huecos de tensión. Esta propiedad rectangular de las fallas de red puede ser utilizada para la identificación del evento. Este tipo de fallas se suelen clasificar como fallas balanceadas y fallas desbalanceadas. Los tipos de fallas son: falla trifásica, monofásica, bifásica y bifásica a tierra, donde las más comunes son las fallas monofásicas y las fallas trifásicas [11]. A continuación se describen cada una de ellas y se muestran las formas de onda de tensión y corriente asociada a los diferentes tipos de falla. Las gráficas se obtuvieron del modelo divisor de tensión de la Figura 5. [20].



• **Falla trifásica**

Como se puede observar en la Figura B. 1, involucra las tres fases del sistema. Es conocida como falla simétrica debido a que no origina desbalances en las tensiones del sistema; corresponden al 5% de las fallas que ocurren en los sistemas eléctricos. En el anexo A.1 se presenta el análisis matemático.

Figura B. 1 Ejemplo falla trifásica a) Esquema falla trifásica b) Tensión rms c) Corriente rms d) Diagrama de tensiones pre-falla y post-falla



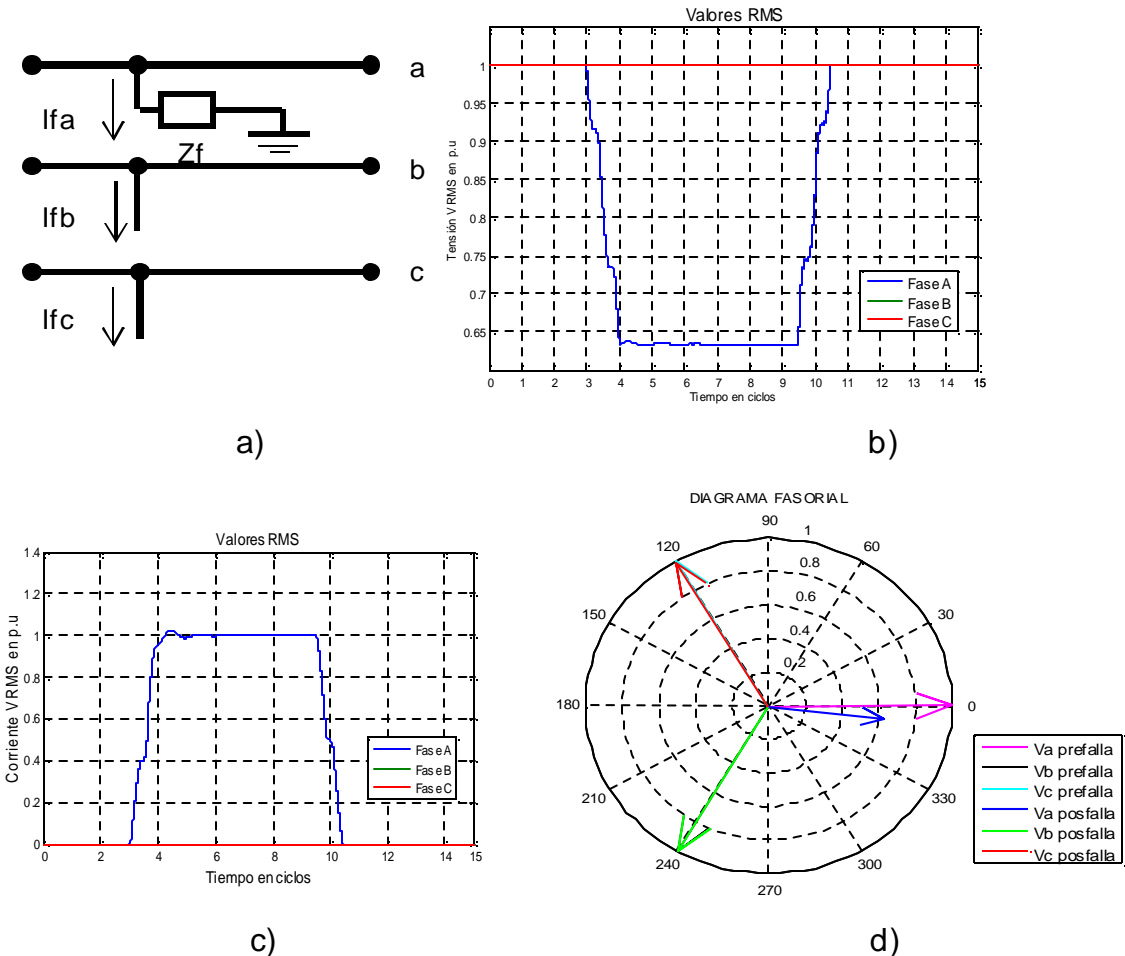
• **Falla monofásica**

Como se dijo anteriormente es la más común en sistemas eléctricos y pueden originarse por descargas atmosféricas o por contacto de conductores con las



estructuras metálicas se puede observar en la Figura B. 2. En el anexo A.3 se presenta el análisis matemático.

Figura B. 2 Ejemplo falla monofásica a) Esquema falla monofásica b) Tensión rms c) Corriente rms d) Diagrama de tensiones pre-falla y post-falla

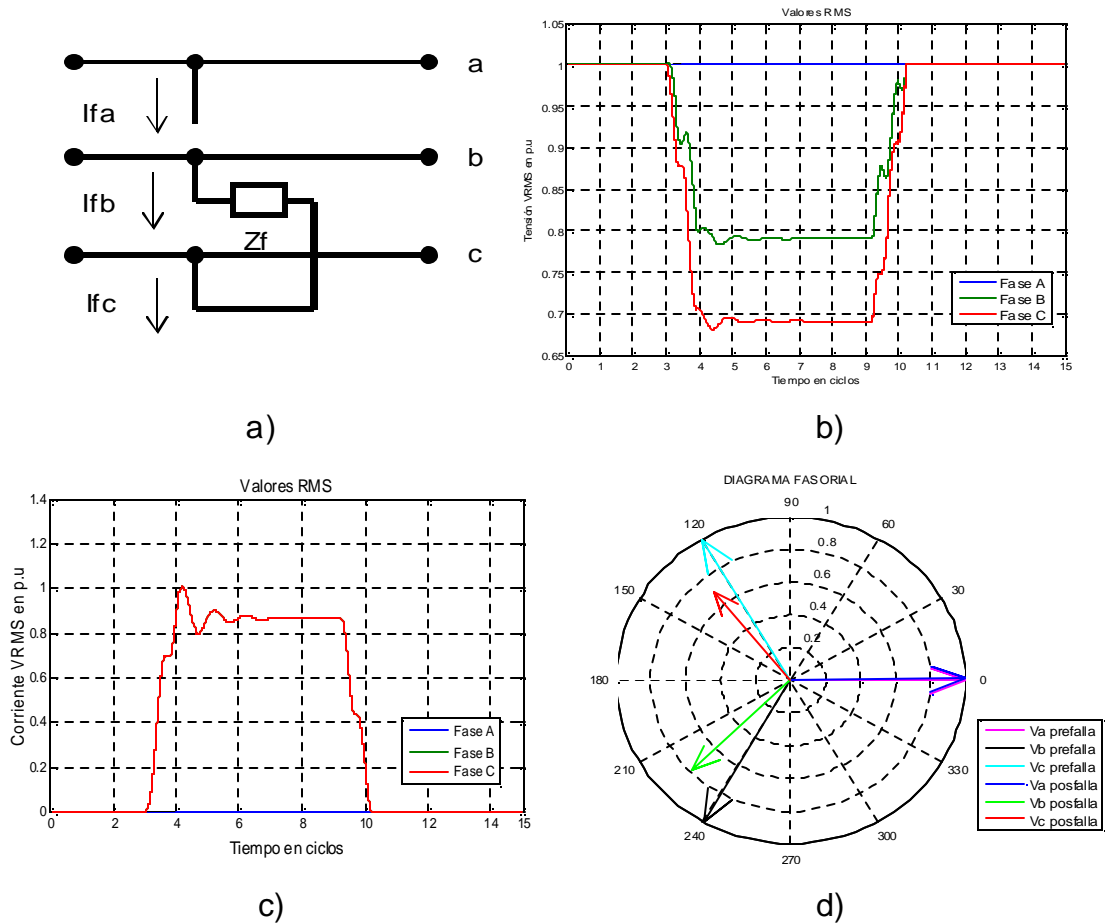


• **Falla bifásica**

Es originada cuando se ponen en contacto directo o por un medio externo dos conductores de un circuito trifásico como se muestra en la Figura B. 3. En el anexo A.4 se presenta el análisis matemático.



Figura B. 3 Ejemplo falla bifásica a) Esquema falla bifásica b) Tensión rms c) Corriente rms d) Diagrama de tensiones pre-falla y post-falla

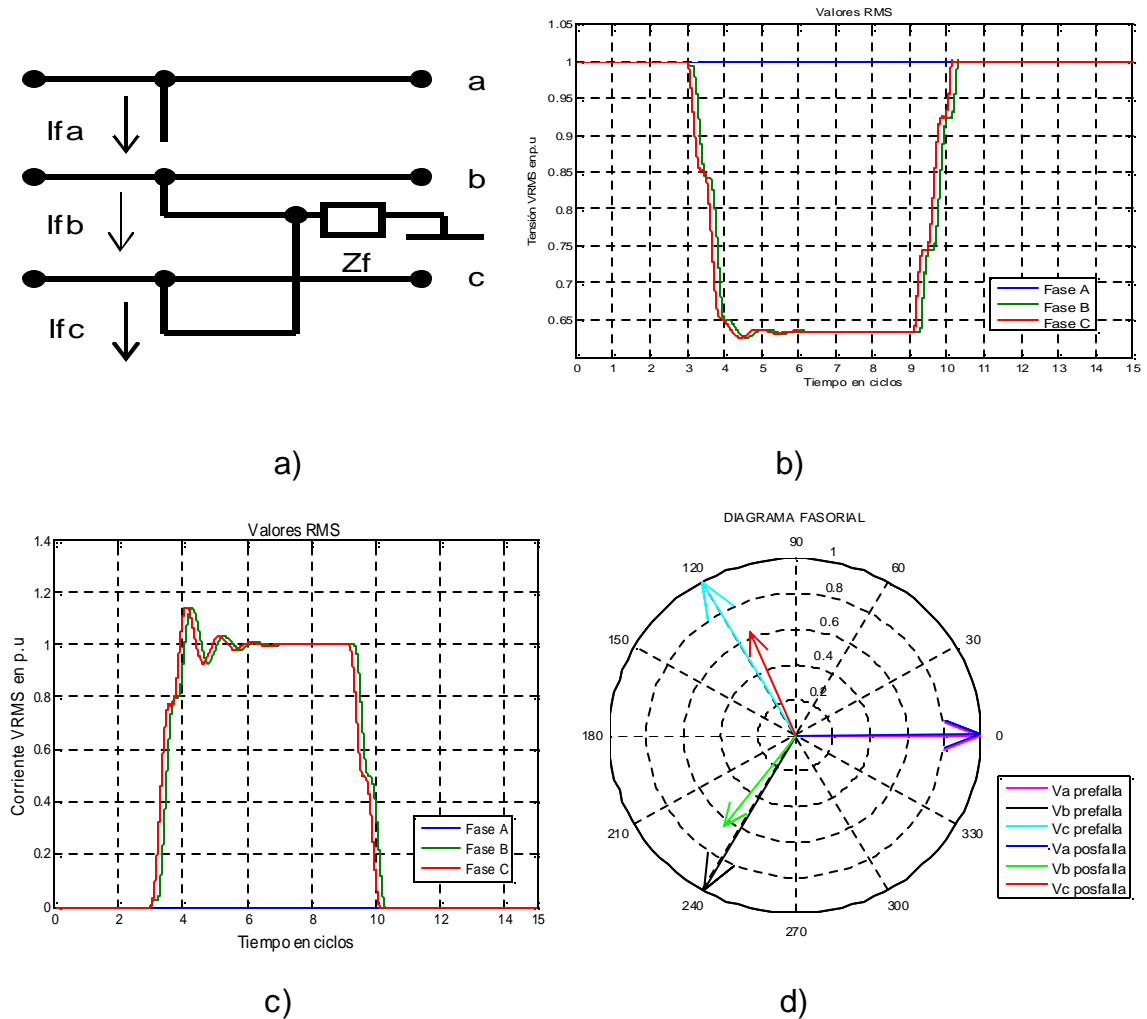


• **Falla bifásica a tierra**

Es originada cuando se ponen en contacto directo o por un medio externo dos circuitos, pero en este caso hace contacto con las estructuras aterrizadas o con tierra por medio de una impedancia de falla como se muestra en la Figura B.4. En el anexo A.5 se presenta el análisis matemático.



Figura B. 4 Ejemplo falla bifásica a tierra a) Esquema falla bifásica b) Tensión rms c) Corriente rms d) Diagrama de tensiones pre-falla y post-falla



B.2 Producidas por operación de elementos propios de la red

Los huecos de tensión pueden ser generados por elementos propios de la red, es decir, energización de transformadores/capacitores, arranque de motores, cambios de carga, etcétera.

- **Energización de transformadores**

La corriente de magnetización que se produce en el momento de la energización de un transformador es debida a un sobreflujo en el núcleo del transformador. En estado estable la corriente de magnetización de un transformador puede ser 1 o 2



por ciento de la corriente nominal, pero puede llegar a 10 ó 20 veces la corriente nominal cuando el transformador es conectado a la fuente. Su magnitud depende principalmente de los parámetros de conmutación, tales como la resistencia del devanado primario, el punto de conmutación de la onda de tensión, y la densidad de flujo remanente en el transformador en el instante de energización [1].

La expresión que gobernará el flujo magnético generado a través del núcleo [21], está dada por la expresión:

$$\phi = -\phi_{max} \cdot \cos\omega t + \phi_{max} + \phi_0 \quad (50)$$

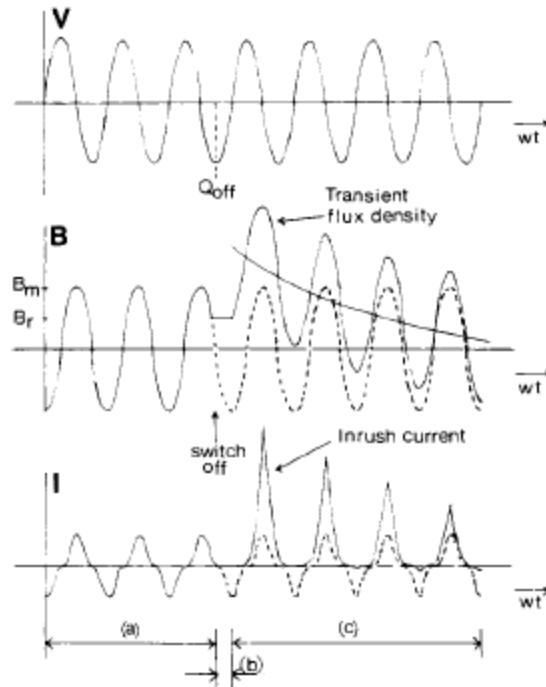
Los términos constantes en la expresión anterior son los que dan el nivel DC a la señal de flujo, pero estos van decayendo debido a las pérdidas haciendo que finalmente desaparezca dicha componente DC.

Si consideramos el flujo inicial como nulo, el valor máximo se presenta cuando la señal de voltaje va por el primer cruce por cero, es decir cuando $\omega t = \pi$, en esta situación el coseno de la expresión del flujo es mínimo y por consiguiente el flujo es máximo e igual a el doble de la condición de amplitud para el flujo.

El establecimiento de este flujo máximo hace llegar el núcleo a la saturación por tanto establece altos niveles de fuerza magnética, la cual es proporcional a la corriente aplicada, generándose corrientes de magnitudes de hasta 8 y 10 veces el valor nominal. La situación empeora cuando el transformador ya había sido energizado y se hace un recierre pues el flujo remanente que tenía, hace aumentar mucho más el valor del flujo máximo, por tanto la corriente inrush del nuevo cierre llega inclusive a valores de 40 veces la corriente nominal dependiendo del diseño del transformador [21]. Analizando la Figura B. 5 se puede entender mejor el fenómeno de saturación:



Figura B. 5 Forma de onda de la tensión de la fuente, densidad de flujo y corriente de magnetización en los periodos. Tomada de [1] a) estado estable, b) interrupción, c) re-energización

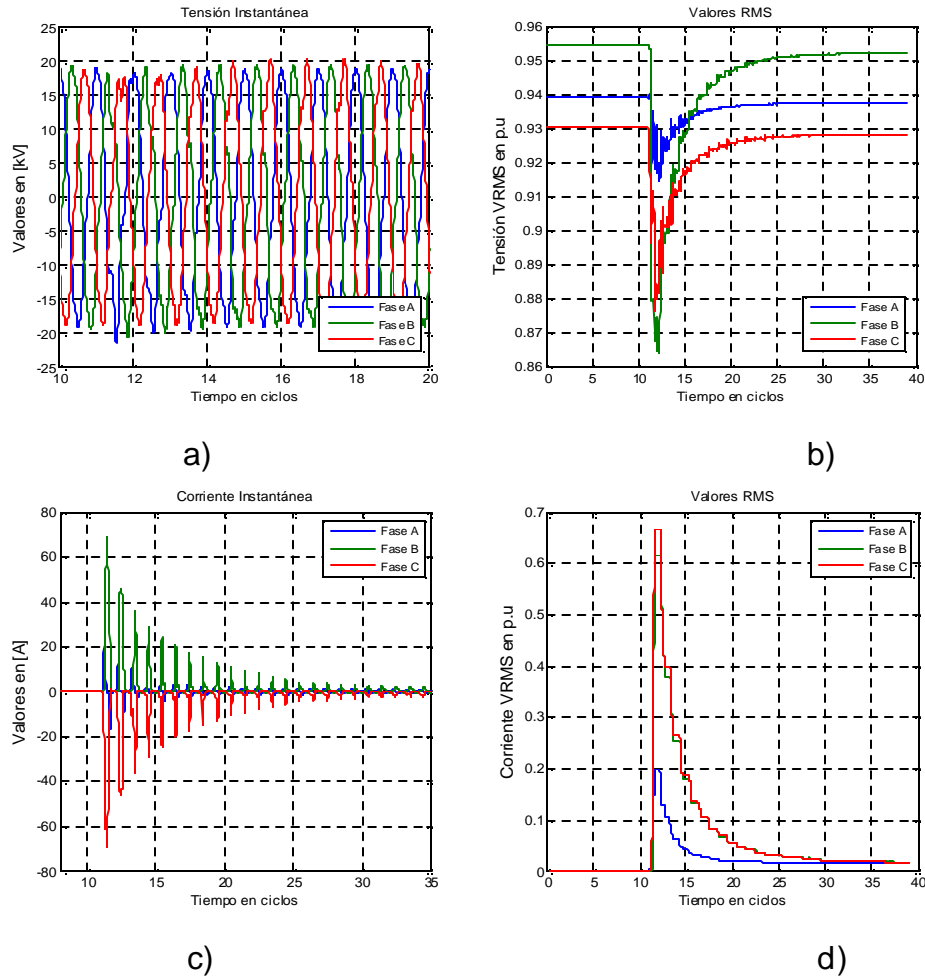


Como puede constatarse en la figura anterior, en estado estable el flujo atrasa en 90° a la tensión de la fuente. Una vez es interrumpida la alimentación de la fuente (Q_{OFF}), el valor y la polaridad del flujo en ese instante se mantiene constante en el núcleo. Cuando se energiza de nuevo el transformador la condición de atraso de 90° por parte del flujo en ese instante no se cumple y por lo tanto se origina el transitorio hasta que se alcanza el estado estable nuevamente [1].

Debido a los efectos de la saturación en el núcleo, las corrientes se caracterizan por tener una gran cantidad de armónicos dentro de los cuales cobra importancia el de segundo orden, que se ve reflejado en la forma de onda de tensión y de corriente, tal como se aprecia en la Figura B.6.



Figura B. 6 Forma de onda de tensión y corriente ante la energización de un transformador sin carga.
 a) Tensión instantánea b) Tensión RMS c) Corriente instantánea d) Corriente RMS



- **Arranque de motores de inducción**

En el momento del arranque, la velocidad del rotor es igual a cero y el deslizamiento por unidad es igual a uno [22]. La corriente de arranque es:

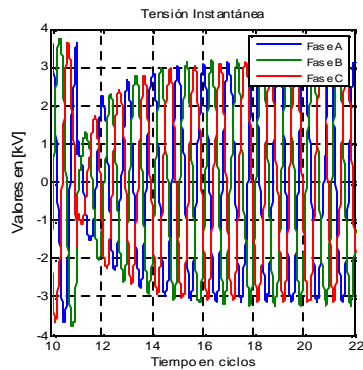
$$I = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R}{s}\right)^2 + X^2}} \quad (51)$$

Dado que la resistencia del rotor es muy pequeña en el momento del arranque en comparación con su valor al alcanzar el deslizamiento especificado, la corriente en el arranque puede llegar a ser de 400 a 800% de la corriente a plena carga [22]. Una corriente en el arranque tan alta provoca una caída de tensión en la línea.

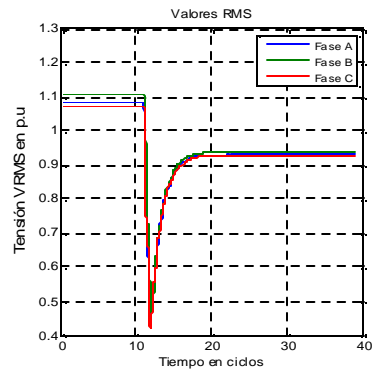


Mientras el motor alcanza su velocidad nominal la corriente se mantiene en valores por encima del valor nominal y esto puede durar desde unos pocos segundos hasta un minuto, dependiendo de la robustez de los parámetros del sistema al que se encuentra conectado el motor y de la inercia de la carga conectada al eje del mismo. [8]. La forma de onda de la tensión es balanceada debido a que el motor es una carga trifásica. Esta es una propiedad importante a la hora de diferenciar el arranque de motores de inducción de la saturación de transformadores. El registro que se muestra a continuación es un hueco de tensión producido por el arranque de un motor de inducción y obtenido de simulación.

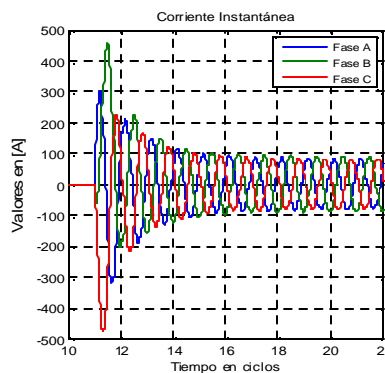
Figura B. 7 Valores de tensión y corriente debido al arranque de un motor. a) Tensión instantánea b) Tensión RMS c) Corriente instantánea d) Corriente VRMS e) Velocidad del motor



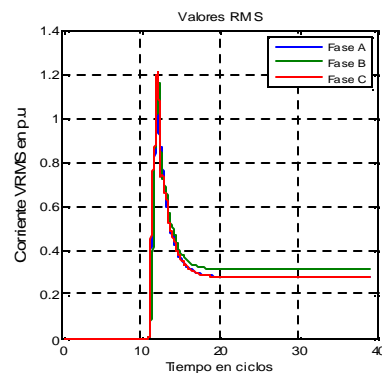
a)



b)



c)



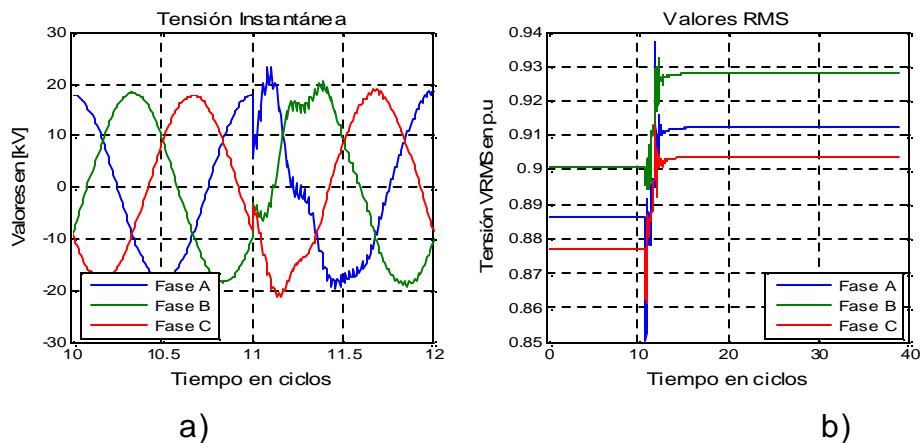
d)

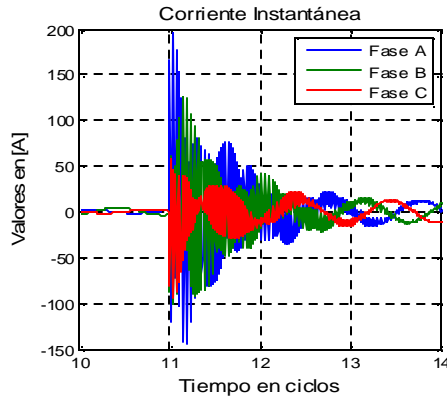


- **Energización de bancos de condensadores**

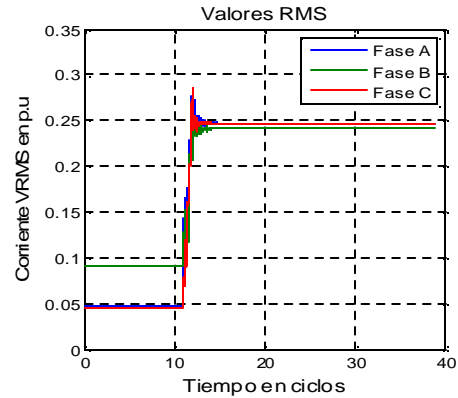
Los bancos de capacitores son de gran utilidad tanto en sistemas de transmisión como de distribución para suministrar potencia reactiva, incrementar la capacidad del sistema, mejorar la regulación de tensión y reducir pérdidas de potencia. La incorporación de bancos de condensadores en los sistemas de distribución introduce problemas adicionales en lo que hace a las sobretensiones transitorias durante las maniobras de energización y desconexión. Estos efectos pueden potenciarse si se considera bancos operando en la misma barra bancos de capacitores en estaciones vecinas. Las maniobras en bancos de condensadores dan origen a fenómenos de sobretensión o de sobrecorriente, que pueden llegar a ser peligrosos para el propio banco o para el equipamiento adyacente. Estos fenómenos ocurren debido a que en el momento de la energización del banco de condensadores, este se comporta como un cortocircuito instantáneo [13]. Como resultado, la tensión instantánea del sistema tiende a cero en el punto de conexión provocando grandes corrientes instantáneas que afectan la calidad del suministro de energía al ocasionar caídas de tensión a través de todo el sistema. El siguiente registro es obtenido por simulación:

Figura B. 8 Formas de onda ante la energización de un banco de capacitores. a) Tensión instantánea b) Tensión RMS c) Corriente instantánea d) Corriente RMS





c)



d)

La Figura B. 8 muestra un transitorio de corta duración debido al intercambio de energía reactiva del banco capacitivo con la energía reactiva inductivo del sistema, provocando oscilaciones de tensión y de corriente que afectan la calidad del servicio. Esta perturbación en particular no se considera como un hueco de tensión, porque la duración de la caída de tensión es menor a 0.5 ciclos. Sin embargo, se decidió tener incluir esta perturbación en el análisis debido a su frecuencia de aparición en los sistemas de distribución de energía.